



TITLE:

特殊土および産業廃棄物の石灰・セメント系安定材による固化処理と強度発現の予測手法に関する研究( Dissertation\_全文 )

AUTHOR(S):

友久, 誠司

---

CITATION:

友久, 誠司. 特殊土および産業廃棄物の石灰・セメント系安定材による固化処理と強度発現の予測手法に関する研究. 京都大学, 1990, 工学博士

ISSUE DATE:

1990-01-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r7088>

RIGHT:

特殊土および産業廃棄物の  
石灰・セメント系安定材による固化処理と  
強度発現の予測手法に関する研究

平成元年 8 月

友 久 誠 司

特殊土および産業廃棄物の  
石灰・セメント系安定材による固化処理と  
強度発現の予測手法に関する研究

平成元年8月

友 久 誠 司

# 目 次

第1章 緒 論	1
1. 1 研究の背景と問題点	1
1. 2 研究の目的と概要	4
参考文献	8
第2章 研究の手法と安定化機構	11
2. 1 研究の手法および分析機器	11
2. 2 安定処理土の改良目標および強度発現の定式化	14
2. 3 安定処理土の反応機構と反応生成物	19
参考文献	23
第3章 特殊土の安定処理に関する研究	27
3. 1 水砕スラグを添加したまさ土の石灰安定処理に関する研究	27
3. 1. 1 概 説	27
3. 1. 2 材料特性と実験概要	28
3. 1. 3 締固めエネルギーおよび養生方法の違いによる強度特性	29
3. 1. 4 まさ土の石灰安定処理の最適処理条件の推定	32
3. 1. 5 反応生成物の同定および定量と微視的構造	34
3. 1. 6 本節のまとめ	38
参考文献	40
3. 2 超軟弱粘土および沖積粘土の安定処理における強度特性と 耐久性に関する研究	63
3. 2. 1 概 説	63
3. 2. 2 材料特性と実験概要	64
3. 2. 3 石灰・セメント系安定材を添加したへどろの強度特性	66
3. 2. 4 へどろ中の有機物と各種安定材による固化処理効果の関係	69
3. 2. 5 石灰・セメント系安定材を添加したへどろの 反応生成物と微視的構造	70
3. 2. 6 生石灰および水砕スラグを添加した沖積粘土の強度特性と耐久性	72
3. 2. 7 石灰・セメント系安定材によるへどろ、沖積粘土の 強度発現の定式化と最適処理条件の推定	75
3. 2. 8 本節のまとめ	77
参考文献	80
3. 3 火山灰の固化および焼結処理による強度特性と微視的構造に関する研究	114
3. 3. 1 概 説	114
3. 3. 2 材料特性と実験概要	115
3. 3. 3 石灰・セメント系安定材を添加した火山灰の強度特性	116
3. 3. 4 焼結処理による固化火山灰の工学的性質と建設材料への適用性	118
3. 3. 5 固化および焼結処理による火山灰の反応生成物と微視的構造	119



3. 3. 6	石灰・セメント系安定材による火山灰の 強度発現の定式化と最適処理条件の推定	121
3. 3. 7	本節のまとめ	123
	参考文献	124
3. 4	本章のまとめ	147
第4章	産業廃棄物の固化処理に関する研究	151
4. 1	水硬性粒度調整スラグの道路用材料としての品質特性と 安定材による固化処理に関する研究	151
4. 1. 1	概 説	151
4. 1. 2	材料特性と実験概要	152
4. 1. 3	水硬性粒度調整スラグの強度特性	153
4. 1. 4	安定材を添加した水硬性粒度調整スラグの強度特性と 固化処理の最適処理条件の推定	155
4. 1. 5	反応生成物の同定と微視的構造	158
4. 1. 6	本節のまとめ	159
	参考文献	160
4. 2	フライアッシュおよび水砕スラグの石灰・セメント系安定材による 固化処理に関する研究	172
4. 2. 1	概 説	172
4. 2. 2	材料特性と実験概要	173
4. 2. 3	石灰・セメント系安定材を添加した水砕スラグおよび フライアッシュの強度特性	175
4. 2. 4	安定材を添加した水砕スラグおよび フライアッシュの反応生成物の同定と微視的構造	178
4. 2. 5	石灰・セメント系安定材によるフライアッシュの 強度発現の定式化と最適処理条件の推定	181
4. 2. 6	本節のまとめ	182
	参考文献	185
4. 3	コンクリート微粉末の石灰・セメント系安定材による固化処理と 土質安定材料への高度利用に関する研究	210
4. 3. 1	概 説	210
4. 3. 2	材料特性と実験概要	211
4. 3. 3	石灰・セメント系安定材を添加したコンクリート微粉末の強度特性	212
4. 3. 4	コンクリート微粉末とセメント、C A S 材の混合による 土質安定材料としての適用	213
4. 3. 5	固化処理したコンクリート微粉末の反応生成物と微視的構造	214
4. 3. 6	石灰・セメント系安定材によるコンクリート微粉末の 強度発現の定式化と最適処理条件の推定	217
4. 3. 7	本節のまとめ	218

参考文献	221
4. 4 製紙焼却灰の石灰・セメント系安定材による固化処理に関する研究	242
4. 4. 1 概 説	242
4. 4. 2 材料特性と実験概要	243
4. 4. 3 石灰・セメント系安定材による製紙焼却灰の強度特性	244
4. 4. 4 電子顕微鏡による固化処理した製紙焼却灰の反応生成物の観察	246
4. 4. 5 石灰・セメント系安定材による製紙焼却灰の強度発現の定式化	247
4. 4. 6 本節のまとめ	249
参考文献	251
4. 5 本章のまとめ	269
第5章 結 論	275
謝 辞	284

## 図、表および写真のリスト

### 第 1 章

表-1.1.1 主な廃棄物の発生量と処分の現状

### 第 2 章

表-2.2.1 路盤に用いる安定処理材料の品質

表-2.2.2 回帰式の種類および変数変換

表-2.3.1 硬化反応生成物とその特徴

### 第 3 章 1 節

表-3.1.1 まさ土の化学成分

表-3.1.2 まさ土の物理的性質

表-3.1.3 安定処理土の配合と養生方法

表-3.1.4 水砕スラグの物理的性質

表-3.1.5 水砕スラグの化学成分

表-3.1.6 安定材の配合および突固めエネルギーと乾燥密度の関係

表-3.1.7 安定処理土の配合と適合回帰式(記号 A)

表-3.1.8 安定処理土の配合と適合回帰式(記号 D)

表-3.1.9 安定処理土の熱分析結果(記号 A-3)

図-3.1.1 まさ土の X 線回折結果

図-3.1.2 まさ土の粒径加積曲線

図-3.1.3 安定処理土の突固め曲線(記号 B)

図-3.1.4 養生日数と強度の関係(記号 A-3、石灰添加率 20%、水砕スラグ 2.5mm 以下)

図-3.1.5 養生日数と強度の関係(記号 A、水砕スラグ 2.5mm 以下)

図-3.1.6 養生日数と強度の関係(記号 B、水砕スラグ 0.85mm 以下、添加率 10%)

図-3.1.7 養生日数と強度の関係(記号 B-3、C)

図-3.1.8 養生日数と強度の関係  
(記号 B、水砕スラグ 0.85mm 以下、添加率 10%、 $E_{c2} = 11.2 \text{ cm} \cdot \text{kgf/cm}^2$ )

図-3.1.9 石灰添加量による強度変化(記号 B、28 日養生、水砕スラグ 0.85mm 以下)

図-3.1.10 水砕スラグ添加量による強度変化(記号 B、28 日養生、水砕スラグ 0.85mm 以下)

図-3.1.11 水砕スラグ添加量による充填率の変化(記号 B、水砕スラグ 0.85mm 以下)

図-3.1.12 養生日数に対する含水比の変化  
(記号 D、石灰添加率 10%、水砕スラグ 75  $\mu\text{m}$  以下、添加率 10%)

- 図-3.1.13 養生日数と強度の関係（記号D、石灰添加率10%、水砕スラグ無添加）
- 図-3.1.14 養生日数と強度の関係（記号D、石灰添加率10%、水砕スラグ75 $\mu$ m以下、添加率10%）
- 図-3.1.15 安定材の配合と強度の関係（記号D、気乾26週間養生）
- 図-3.1.16 安定材の配合と強度の関係（記号D、湿潤箱26週間養生）
- 図-3.1.17 水砕スラグ添加率と回帰係数の関係（記号A、気乾養生、回帰式(5)）
- 図-3.1.18 水砕スラグ添加率と回帰係数の関係（記号A、湿潤養生、回帰式(5)）
- 図-3.1.19 養生日数と強度の関係（記号D、回帰式(4)）
- 図-3.1.20 安定材の配合と回帰係数の関係（記号D、回帰式(4)）
- 図-3.1.21 養生日数と強度の関係（記号D、回帰式(5)）
- 図-3.1.22 安定材の配合と回帰係数の関係（記号D、回帰式(5)）
- 図-3.1.23 養生日数と強度の関係（記号D、湿潤箱養生、回帰式(5)）
- 図-3.1.24 X線回折図（記号A-3、石灰添加率10%、水砕スラグ添加率10%）
- 図-3.1.25 示差熱分析曲線（記号A-3、石灰添加率20%、水砕スラグ添加率10%）
- 図-3.1.26 示差熱分析曲線（記号D、水砕スラグ添加率10%）
- 図-3.1.27 養生日数と消石灰量の関係（記号D、試料50mg）
- 図-3.1.28 養生日数と炭酸カルシウム量の関係（記号D、試料50mg）
- 図-3.1.29 養生日数と質量減少勾配（375～650℃）の関係（記号D、試料50mg）
- 図-3.1.30 養生日数とカルシウムイオン量の関係（記号D、試料50mg）
- 写真-3.1.1 破碎水砕スラグ（粒径850 $\mu$ m以下）
- 写真-3.1.2 記号A-3、石灰10%、水砕スラグ（2.5mm以下）10%添加のSEM像（湿潤養生、2年後）
- 写真-3.1.3 記号A-3、石灰10%、水砕スラグ（2.5mm以下）10%添加のSEM像（気乾養生、2年後）
- 写真-3.1.4 記号D、石灰10%、水砕スラグ（75 $\mu$ m以下）10%添加のSEM像（26週養生）

### 第3章2節

- 表-3.2.1 へどろの化学成分
- 表-3.2.2 へどろの物理的性質
- 表-3.2.3 安定材の配合
- 表-3.2.4 沖積粘土の物理的性質
- 表-3.2.5 へどろAに対するへどろBの強度比
- 表-3.2.6 フミン酸の抽出試験結果
- 表-3.2.7 水砕スラグの溶出試験結果
- 表-3.2.8 安定処理土の配合と適合回帰式（へどろC）
- 表-3.2.9 養生初期強度（3，7日）による長期強度（28日）の推定（へどろC）

- 表-3.2.10 安定処理土の配合と適合回帰式（沖積粘土）
- 図-3.2.1 へどろの粒径加積曲線
- 図-3.2.2 へどろおよび沖積粘土のX線回折結果
- 図-3.2.3 団粒分析装置の機構
- 図-3.2.4 養生日数と強度の関係（へどろA）
- 図-3.2.5 養生日数と強度の関係（へどろB）
- 図-3.2.6 安定材添加率と強度の関係（へどろA）
- 図-3.2.7 安定材添加率と強度の関係（へどろB）
- 図-3.2.8 養生日数と含水比の関係（へどろB）
- 図-3.2.9 安定材添加率と変形係数の関係（へどろA）
- 図-3.2.10 安定材添加率と変形係数の関係（へどろB）
- 図-3.2.11 養生日数と強度の関係（へどろB、HBC、HC）
- 図-3.2.12 養生日数と強度の関係（へどろC、HBC、HC）
- 図-3.2.13 養生日数と強度の関係（へどろC、安定材添加率12%）
- 図-3.2.14 養生日数と変形係数の関係（へどろC、HBC、HC）
- 図-3.2.15 養生日数と変形係数の関係（へどろC、HBK、HK）
- 図-3.2.16 養生日数とpHの変化（へどろC）
- 図-3.2.17 試料中の有機物の強度発現への影響（へどろC、HBC）
- 図-3.2.18 試料中の有機物と各種安定材の強度比較（へどろC、安定材添加率9%）
- 図-3.2.19 塑性指数の減少量と強度の関係（へどろC、安定材添加率9%）
- 図-3.2.20 安定材添加率とエトリンガイトのX線回折強度の関係（へどろA、28日養生）
- 図-3.2.21 安定材添加率とエトリンガイトのX線回折強度の関係（へどろC、3、28日養生）
- 図-3.2.22 エトリンガイトのX線回折強度と強度の関係（へどろC）
- 図-3.2.23 養生日数と強度の関係（試料D、水砕スラグ0.85mm以下）
- 図-3.2.24 養生日数と強度の関係（試料D、水砕スラグ75 $\mu$ m以下）
- 図-3.2.25 養生日数と強度の関係（試料D、水砕スラグのブレン値約4000cm<sup>2</sup>/g）
- 図-3.2.26 安定材の配合と強度の関係（試料D、28日養生）
- 図-3.2.27 耐久性試験サイクル数と残留土質量率の関係（試料E、14日養生）
- 図-3.2.28 安定材の配合とスレーキング率の関係（試料E、7、14日養生）
- 図-3.2.29 安定材の配合と粒径加積通過率の関係（試料E、7日養生）
- 図-3.2.30 安定材の配合とスレーキング率の関係（試料E、56日養生）
- 図-3.2.31 残留土質量率とスレーキング率の関係（試料E、7、14日養生）
- 図-3.2.32 安定材添加率と回帰係数の関係（へどろC、回帰式(5)）
- 図-3.2.33 安定材の種類と回帰係数の関係（へどろC、回帰式(5)）
- 図-3.2.34 養生日数と強度変化（へどろC、回帰式(5)）

- 図-3.2.35 養生日数と強度変化（へどろC、HBC、回帰式(5)）
- 図-3.2.36 回帰式(5)による短期強度から長期強度の推定
- 図-3.2.37 養生日数と強度の関係  
（試料D、生石灰10%、水砕スラグの粒径0.85mm以下、回帰式(4)）
- 図-3.2.38 養生日数と強度の関係  
（試料D、生石灰10%、水砕スラグのブレン値約4000cm<sup>2</sup>/g、回帰式(4)）
- 図-3.2.39 水砕スラグの粒径と回帰係数の関係（試料D、回帰式(4)）
- 図-3.2.40 石灰添加率と回帰係数の関係（試料D、回帰式(4)）
- 図-3.2.41 水砕スラグの粒径の違いによる強度変化（試料D、回帰式(4)）
- 写真-3.2.1 へどろCのSEM像
- 写真-3.2.2 へどろCのSEM像
- 写真-3.2.3 耐久性試験供試体と有孔アクリル板
- 写真-3.2.4 へどろB処理土のSEM像（HBC添加率3%、28日養生）
- 写真-3.2.5 へどろA処理土のSEM像（HC添加率12%、3日養生）
- 写真-3.2.6 へどろB処理土のSEM像（HC添加率12%、7日養生）
- 写真-3.2.7 へどろA処理土のSEM像（HBC添加率12%、28日養生）
- 写真-3.2.8 へどろB処理土のSEM像（HBC添加率12%、3日養生）
- 写真-3.2.9 へどろA処理土のSEM像（HIGCS添加率12%、7日養生）
- 写真-3.2.10 へどろB処理土のSEM像（HIGCS添加率12%、91日養生）
- 写真-3.2.11 へどろA処理土のSEM像（HIGC添加率12%、3日養生）
- 写真-3.2.12 へどろB処理土のSEM像（HIGC添加率12%、7日養生）
- 写真-3.2.13 へどろA処理土のSEM像（HBL添加率12%、7日養生）
- 写真-3.2.14 へどろB処理土のSEM像（HBL添加率12%、7日養生）
- 写真-3.2.15 へどろB処理土のSEM像（HBL添加率12%、3日養生）
- 写真-3.2.16 へどろC処理土のSEM像（HC添加率12%、91日養生）
- 写真-3.2.17 へどろC処理土のSEM像（HBC添加率12%、28日養生）
- 写真-3.2.18 へどろC処理土のSEM像（HK添加率12%、7日養生）
- 写真-3.2.19 へどろC処理土のSEM-EDXA分析結果（HC添加率12%、28日養生）
- 写真-3.2.20 へどろC処理土のSEM-EDXA分析結果（HBC添加率12%、28日養生）
- 写真-3.2.21 耐久性試験の供試体（生石灰10%、水砕スラグ10%、1サイクル後）
- 写真-3.2.22 耐久性試験の供試体（生石灰10%、水砕スラグ10%、5サイクル後）

### 第3章3節

表-3.3.1 火山灰の化学成分

表-3.3.2 火山灰の物理的性質

表－3.3.3	安定材の配合と供試体の成形時含水比
表－3.3.4	供試体の乾燥密度の比較（石灰系安定材）
表－3.3.5	安定材添加率とC B R
表－3.3.6	火山灰の溶出試験結果
表－3.3.7	安定処理した火山灰と適合回帰式
図－3.3.1	火山灰の粒径加積曲線
図－3.3.2	火山灰のX線回折結果
図－3.3.3	曲げ強度試験装置の概要
図－3.3.4	一軸圧縮試験の実験手順
図－3.3.5	曲げ強度試験の実験手順
図－3.3.6	養生初期の一軸圧縮強度の変化
図－3.3.7	養生日数と一軸圧縮強度の関係（安定材添加率5％）
図－3.3.8	養生日数と一軸圧縮強度の関係（含水比30％）
図－3.3.9	未破碎試料に対する破碎試料供試体の強度比
図－3.3.10	安定材添加率と曲げ強度の関係（含水比30％）
図－3.3.11	安定材添加率と透水係数の関係（含水比30％）
図－3.3.12	成形時含水比と曲げ強度の関係（安定材添加率10％）
図－3.3.13	成形時含水比と透水係数の関係（安定材添加率10％）
図－3.3.14	安定材添加率および成形時含水比と乾燥密度の関係（C G）
図－3.3.15	安定材添加率および成形時含水比と線収縮係数の関係（C G）
図－3.3.16	安定材添加率および成形時含水比と乾燥密度の関係（L G）
図－3.3.17	安定材添加率および成形時含水比と線収縮係数の関係（L G）
図－3.3.18	養生日数と反応生成物のX線回折強度（L G 20％、破碎火山灰、最適含水比）
図－3.3.19	養生日数と反応生成物のX線回折強度（C G 20％、破碎火山灰、最適含水比）
図－3.3.20	安定材添加率と回帰係数の関係（最適含水比）
図－3.3.21	安定材の種類と回帰係数の関係（最適含水比）
図－3.3.22	安定材添加率と回帰係数の関係（含水比30％）
図－3.3.23	安定材の種類と回帰係数の関係（含水比30％）
図－3.3.24	養生日数と一軸圧縮強度の関係（安定材添加率20％、含水比30％、回帰式(4)）
図－3.3.25	養生日数と一軸圧縮強度の関係（安定材添加率5％、含水比30％、回帰式(4)）
図－3.3.26	養生日数と一軸圧縮強度の関係（安定材添加率20％、最適含水比、回帰式(4)）
写真－3.3.1	火山灰のSEM像
写真－3.3.2	破碎火山灰のSEM像
写真－3.3.3	火山灰のSEM－EDXA分析結果
写真－3.3.4	火山灰の反射電子像

写真－3.3.5 固化処理灰のSEM像（LG5％、3日養生、未破碎）

写真－3.3.6 固化処理灰のSEM像（LG5％、3日養生、未破碎）

写真－3.3.7 固化処理灰のSEM－EDXA分析結果（LG20％、28日養生、破碎）

写真－3.3.8 固化処理灰のSEM－EDXA分析結果（CG20％、28日養生、破碎）

写真－3.3.9 固化処理灰のSEM－EDXA分析結果（LG20％、28日養生、破碎）

写真－3.3.10 固化処理灰のSEM像（LG10％、3日養生、破碎）

写真－3.3.11 固化処理灰のSEM像（LG10％、7日養生、破碎）

写真－3.3.12 固化処理灰のSEM像（LG10％、28日養生、破碎）

写真－3.3.13 固化処理灰のSEM像（CG10％、3日養生、破碎）

写真－3.3.14 固化処理灰のSEM像（CG10％、7日養生、破碎）

写真－3.3.15 固化処理灰のSEM像（CG10％、28日養生、破碎）

写真－3.3.16 固化処理灰のSEM像（CG20％、91日養生、未破碎）

写真－3.3.17 板状供試体のSEM像（LG20％、未焼結処理）

写真－3.3.18 板状供試体のSEM像（LG20％、未焼結処理）

写真－3.3.19 板状供試体のSEM像（CG5％、焼結処理1080℃）

写真－3.3.20 板状供試体のSEM像（CG20％、焼結処理1080℃）

写真－3.3.21 板状供試体のSEM像（CG5％、焼結処理1050℃）

写真－3.3.22 板状供試体のSEM像（CG20％、焼結処理1050℃）

写真－3.3.23 板状供試体のSEM像（LG5％、焼結処理1080℃）

写真－3.3.24 板状供試体のSEM像（LG20％、焼結処理1080℃）

写真－3.3.25 板状供試体のSEM像（LG5％、焼結処理1050℃）

写真－3.3.26 板状供試体のSEM像（LG20％、焼結処理1050℃）

#### 第4章1節

表－4.1.1 高炉スラグの化学成分

表－4.1.2 水硬性粒度調整スラグの物理的性質

表－4.1.3 供試体作成および養生方法

表－4.1.4 安定材の配合と養生方法

表－4.1.5 安定材の配合と長期養生の強度発現傾向

表－4.1.6 X線回折および熱分析試験の結果

図－4.1.1 水硬性粒度調整スラグの粒径加積曲線

図－4.1.2 水硬性粒度調整スラグの締固め曲線

図－4.1.3 養生日数と強度の関係（試験方法①、大供試体）

図－4.1.4 養生日数と破壊時の最大ひずみ量の関係（試験方法①、大供試体）

図－4.1.5 養生日数に対する養生方法と強度の関係（試験方法②③、小供試体）



- 図－4.1.6 養生日数と強度の関係（試験方法①②③、試料C、成形時含水比9％）
- 図－4.1.7 供試体の大きさ、試験方法と強度の関係  
（試験方法①②③、試料C、D、成形時含水比9％）
- 図－4.1.8 養生日数と強度の関係（試験方法④、試料C）
- 図－4.1.9 養生日数と供試体の含水比の関係（試験方法④、試料C）
- 図－4.1.10 養生日数と強度の関係（試験方法⑤、試料C）
- 図－4.1.11 養生日数と強度の関係（試験方法④、試料A）
- 図－4.1.12 養生方法と強度の関係（試験方法④、試料A）
- 図－4.1.13 養生日数と強度の関係（試験方法④、試料A、B）
- 図－4.1.14 養生方法と処理土の保水性（試験方法④、試料A、 $pF=1.6$ ）
- 図－4.1.15 養生日数と吸水率の関係（試験方法①、大供試体）
- 写真－4.1.1 処理土中の鉄分によりクラックの生じた供試体
- 写真－4.1.2 鉄分によりクラックの生じた供試体の一軸圧縮試験
- 写真－4.1.3 石膏の添加によりクラックの生じた供試体
- 写真－4.1.4 石膏の添加によりクラックの生じた供試体
- 写真－4.1.5 試料CのSEM像（養生前）
- 写真－4.1.6 試料CのSEM像（気乾養生、1年後）
- 写真－4.1.7 試料CのSEM像（湿潤養生、1年後）
- 写真－4.1.8 試料CのSEM像（くり返し養生、1年後）
- 写真－4.1.9 試料B2のSEM像（くり返し養生、1年後）

#### 第4章2節

- 表－4.2.1 フライアッシュおよび水砕スラグの化学成分
- 表－4.2.2 フライアッシュおよび水砕スラグの物理的性質
- 表－4.2.3 安定材の配合
- 表－4.2.4 固化処理灰の配合と成形時含水比
- 表－4.2.5 C A S 材を添加した水砕スラグの強度増加率
- 表－4.2.6 フライアッシュの溶出試験結果
- 表－4.2.7 固化処理したフライアッシュの配合と適合回帰式
- 図－4.2.1 フライアッシュと水砕スラグの粒径加積曲線
- 図－4.2.2 フライアッシュのX線回折結果（国内炭）
- 図－4.2.3 フライアッシュのX線回折結果（国外炭）
- 図－4.2.4 C A S 材添加率と強度の関係
- 図－4.2.5 加水処理灰の養生日数と強度の関係
- 図－4.2.6 含水比の違いによるC A S 材添加率と強度の関係（国外炭）

- 図-4.2.7 締固めを行わない処理灰とスラグの強度変化
- 図-4.2.8 締固めた処理灰とスラグの強度変化
- 図-4.2.9 養生日数と処理灰のpHの関係(国内炭)
- 図-4.2.10 養生日数と処理灰のpHの関係(国外炭、スラグ)
- 図-4.2.11 安定材の配合とエトリンガイトのX線回折強度(国内炭)
- 図-4.2.12 安定材の配合とエトリンガイトのX線回折強度(国外炭)
- 図-4.2.13 安定材の配合と水酸化カルシウムのX線回折強度(国外炭)
- 図-4.2.14 安定材の配合と反応生成物のX線回折強度
- 図-4.2.15 固化処理したスラグの反応生成物のX線回折強度
- 図-4.2.16 安定材の種類と回帰係数の関係(回帰式(5))
- 図-4.2.17 フライアッシュの種類および成形時含水比と回帰係数の関係(回帰式(5))
- 図-4.2.18 固化処理したフライアッシュの養生日数と強度の関係(回帰式(5))
- 図-4.2.19 固化処理したフライアッシュの養生日数と強度の関係  
(国内炭、含水比30%、回帰式(5))
- 図-4.2.20 固化処理したフライアッシュの養生日数と強度の関係  
(国内炭、含水比50%、回帰式(5))
- 写真-4.2.1 フライアッシュのSEM-EDXA分析結果(国内炭)
- 写真-4.2.2 フライアッシュのSEM-EDXA分析結果(国外炭)
- 写真-4.2.3 フライアッシュのSEM像(国内炭)
- 写真-4.2.4 フライアッシュのSEM像(国内炭)
- 写真-4.2.5 不規則な形状のフライアッシュのSEM像(国内炭)
- 写真-4.2.6 不規則な形状のフライアッシュのSEM像(国内炭)
- 写真-4.2.7 中空状のフライアッシュのSEM像(国内炭)
- 写真-4.2.8 不規則な形状のフライアッシュのSEM像(国外炭)
- 写真-4.2.9 高炉水砕スラグのSEM像
- 写真-4.2.10 加水したフライアッシュのSEM像(国内炭、7日養生)
- 写真-4.2.11 加水したフライアッシュのSEM像(国内炭、7日養生)
- 写真-4.2.12 加水したフライアッシュのSEM像(国内炭、7日養生)
- 写真-4.2.13 加水したフライアッシュのSEM像(国外炭、7日養生)
- 写真-4.2.14 加水したフライアッシュのSEM像(国外炭、7日養生)
- 写真-4.2.15 加水したフライアッシュのSEM-EDXA分析結果(国内炭、7日養生)
- 写真-4.2.16 固化処理したスラグSAのSEM像(7日養生、含水比30%)
- 写真-4.2.17 固化処理したスラグSAのSEM像(7日養生、含水比30%)
- 写真-4.2.18 固化処理したスラグSAのSEM-EDXA分析結果(7日養生、含水比50%)
- 写真-4.2.19 固化処理したスラグSAのSEM像(28日養生、含水比50%)

写真－4.2.20 固化処理したスラグS AのSEM像（28日養生、含水比30％）

写真－4.2.21 F50DのSEM像（国内炭、3日養生、含水比30％）

写真－4.2.22 F50DのSEM像（国内炭、3日養生、含水比30％）

写真－4.2.23 F50DのSEM像（国内炭、28日養生、含水比30％）

写真－4.2.24 F50DのSEM像（国内炭、28日養生、含水比30％）

写真－4.2.25 F50WのSEM像（国内炭、28日養生、含水比50％）

写真－4.2.26 F50WのSEM像（国内炭、28日養生、含水比50％）

写真－4.2.27 F50WのSEM像（国内炭、28日養生、含水比50％）

写真－4.2.28 F50WのSEM像（国内炭、28日養生、含水比50％）

写真－4.2.29 F70WのSEM像（国内炭、28日養生、含水比50％）

写真－4.2.30 F70WのSEM像（国内炭、28日養生、含水比50％）

写真－4.2.31 F70DのSEM像（国内炭、28日養生、含水比30％）

写真－4.2.32 F60CWのSEM像（国内炭、28日養生、含水比50％）

写真－4.2.33 F60CWのSEM像（国内炭、28日養生、含水比50％）

写真－4.2.34 F50WのSEM像（国外炭、3日養生、含水比65％）

写真－4.2.35 F50WのSEM像（国外炭、3日養生、含水比65％）

写真－4.2.36 F50WのSEM像（国外炭、28日養生、含水比65％）

写真－4.2.37 F50WのSEM像（国外炭、28日養生、含水比65％）

写真－4.2.38 F50WのSEM－EDXA分析結果（国外炭、28日養生、含水比65％）

写真－4.2.39 F50WのSEM像（国外炭、28日養生、含水比65％）

写真－4.2.40 F50DのSEM像（国外炭、3日養生、含水比35％）

写真－4.2.41 F50DのSEM像（国外炭、3日養生、含水比35％）

写真－4.2.42 F50DのSEM像（国外炭、28日養生、含水比35％）

写真－4.2.43 F50DのSEM像（国外炭、28日養生、含水比35％）

写真－4.2.44 F50DのSEM像（国外炭、28日養生、含水比35％）

写真－4.2.45 F60CWのSEM像（国外炭、28日養生、含水比65％）

#### 第4章3節

表－4.3.1 コンクリート微粉末の物理的性質

表－4.3.2 信州ロームの物理的性質

表－4.3.3 低強度の固化を目的としたコンクリート微粉末の配合と供試体の成形時含水比

表－4.3.4 高強度の固化を目的としたコンクリート微粉末の配合と供試体の成形時含水比

表－4.3.5 配合C C供試体に対する配合C B Cの強度比

表－4.3.6 固化処理したコンクリート微粉末の配合と適合回帰式

表－4.3.7 安定材C B C中のC A S材の割合と適合回帰式

- 表－4.3.8 高強度材料として固化処理したコンクリート微粉末の配合と適合回帰式
- 図－4.3.1 コンクリート微粉末と信州ロームの粒径加積曲線
- 図－4.3.2 コンクリート微粉末のX線回折結果
- 図－4.3.3 信州ロームのX線回折結果
- 図－4.3.4 養生日数と強度の関係（CBC、CC、含水比35%）
- 図－4.3.5 安定材中のCAS材の混合率と強度の関係（安定材添加率9%）
- 図－4.3.6 養生日数と強度の関係（C50、C60、C70、C60C、CA、含水比40%）
- 図－4.3.7 信州ローム処理土のCBRと一軸圧縮強度の関係（LC50、LC50C）
- 図－4.3.8 信州ローム処理土の安定材添加率とCBRの関係（LC50、LC50C）
- 図－4.3.9 養生日数とエトリンガイトのX線回折強度の関係（CC、CBC）
- 図－4.3.10 安定材添加率と反応生成物のX線回折強度の関係（CC、CBC、7日養生）
- 図－4.3.11 養生日数とエトリンガイトのX線回折強度の関係（C50、C60、C70、C60C、CA）
- 図－4.3.12 養生日数とCSH系反応生成物のX線回折強度の関係（C50、C60、C70、C60C、CA）
- 図－4.3.13 安定材添加率と回帰係数の関係（CC、CBC、回帰式(5)）
- 図－4.3.14 養生日数と強度の関係（CC、CBC、回帰式(5)）
- 図－4.3.15 安定材の配合記号と回帰係数の関係（C50、C60、C70、C60C、回帰式(5)）
- 写真－4.3.1 コンクリート微粉末のSEM像
- 写真－4.3.2 コンクリート微粉末のSEM像
- 写真－4.3.3 コンクリート微粉末のSEM－EDXA分析結果
- 写真－4.3.4 信州ロームのSEM－EDXA分析結果
- 写真－4.3.5 CCのSEM像（3日養生）
- 写真－4.3.6 CCのSEM像（3日養生）
- 写真－4.3.7 CCのSEM－EDXA分析結果（3日養生）
- 写真－4.3.8 CCのSEM像（28日養生）
- 写真－4.3.9 CCのSEM像（28日養生）
- 写真－4.3.10 CBCのSEM像（3日養生）
- 写真－4.3.11 CBCのSEM像（3日養生）
- 写真－4.3.12 CBCのSEM像（28日養生）
- 写真－4.3.13 CBCのSEM像（28日養生）
- 写真－4.3.14 CBCのSEM像（28日養生）
- 写真－4.3.15 CBCのSEM像（28日養生）
- 写真－4.3.16 CBCのSEM－EDXA分析結果（3日養生）
- 写真－4.3.17 C50のSEM像（28日養生）
- 写真－4.3.18 C50のSEM像（28日養生）
- 写真－4.3.19 C50のSEM像（28日養生）

写真-4.3.20 C50のSEM像(28日養生)  
写真-4.3.21 C50のSEM-EDXA分析結果(28日養生)  
写真-4.3.22 C50のSEM-EDXA分析結果(28日養生)  
写真-4.3.23 C70のSEM像(28日養生)  
写真-4.3.24 C70のSEM像(28日養生)  
写真-4.3.25 C70のSEM像(28日養生)  
写真-4.3.26 C60CのSEM像(28日養生)  
写真-4.3.27 C60CのSEM像(28日養生)  
写真-4.3.28 C60CのSEM像(28日養生)  
写真-4.3.29 C50で固化処理した信州ロームのSEM像(安定材添加率30%、7日養生)  
写真-4.3.30 C50Cで固化処理した信州ロームのSEM像(安定材添加率20%、7日養生)  
写真-4.3.31 C50Cで固化処理した信州ロームのSEM像(安定材添加率20%、7日養生)  
写真-4.3.32 C50Cで固化処理した信州ロームのSEM像(安定材添加率20%、7日養生)  
写真-4.3.33 C50で固化処理した信州ロームのSEM像(安定材添加率20%、7日養生)  
写真-4.3.34 C50で固化処理した信州ロームのSEM像(安定材添加率20%、7日養生)

#### 第4章4節

表-4.4.1 製紙焼却灰の化学成分  
表-4.4.2 製紙焼却灰の物理的性質  
表-4.4.3 安定材の配合と供試体の成形時含水比  
表-4.4.4 製紙焼却灰のCBR試験結果  
表-4.4.5 製紙焼却灰の溶出試験結果  
表-4.4.6 固化処理した製紙焼却灰の配合と適合回帰式(回帰式(5))  
表-4.4.7 固化処理した製紙焼却灰の配合と適合回帰式(回帰式(2))  
図-4.4.1 焼却灰の粒径加積曲線  
図-4.4.2 焼却灰のX線回折結果  
図-4.4.3 養生日数と強度の関係(安定材添加率5%)  
図-4.4.4 養生日数と強度の関係(セメント添加率10%)  
図-4.4.5 養生日数と強度の関係(セメント添加率30%)  
図-4.4.6 成形時含水比と強度の関係(セメント、91日養生)  
図-4.4.7 養生日数と強度の関係(CAS材添加率10%)  
図-4.4.8 養生日数と強度の関係(CAS材添加率30%)  
図-4.4.9 成形時含水比と強度の関係(CAS材、91日養生)  
図-4.4.10 安定材添加率と強度の関係(セメント)  
図-4.4.11 安定材添加率と強度の関係(CAS材)

- 図-4.4.12 成形時含水比と乾燥密度の関係（セメント、91日養生）
- 図-4.4.13 成形時含水比と乾燥密度の関係（C A S 材、91日養生）
- 図-4.4.14 養生日数と強度の関係（成形時含水比60%）
- 図-4.4.15 安定材添加率と回帰係数の関係（セメント、回帰式(5)）
- 図-4.4.16 安定材添加率と回帰係数の関係（C A S 材、回帰式(5)）
- 図-4.4.17 成形時含水比と回帰係数の関係（セメント、回帰式(5)）
- 図-4.4.18 成形時含水比と回帰係数の関係（C A S 材、回帰式(5)）
- 図-4.4.19 強度試験の結果と回帰式の比較（セメント添加率30%、含水比40%）
- 図-4.4.20 養生日数と強度の関係（C A S 材添加率20%）
- 写真-4.4.1 製紙焼却灰のSEM像
- 写真-4.4.2 製紙焼却灰のSEM像
- 写真-4.4.3 製紙焼却灰のSEM-E D X A 分析結果
- 写真-4.4.4 セメント処理灰のSEM像（添加率10%、含水比40%、7日養生）
- 写真-4.4.5 セメント処理灰のSEM像（添加率10%、含水比40%、91日養生）
- 写真-4.4.6 セメント処理灰のSEM像（添加率10%、含水比80%、7日養生）
- 写真-4.4.7 セメント処理灰のSEM像（添加率30%、含水比40%、7日養生）
- 写真-4.4.8 セメント処理灰のSEM像（添加率30%、含水比40%、7日養生）
- 写真-4.4.9 セメント処理灰のSEM像（添加率30%、含水比80%、91日養生）
- 写真-4.4.10 C A S 材処理灰のSEM像（添加率10%、含水比60%、28日養生）
- 写真-4.4.11 C A S 材処理灰のSEM像（添加率10%、含水比80%、7日養生）
- 写真-4.4.12 C A S 材処理灰のSEM像（添加率10%、含水比80%、7日養生）
- 写真-4.4.13 C A S 材処理灰のSEM像（添加率30%、含水比40%、7日養生）
- 写真-4.4.14 C A S 材処理灰のSEM像（添加率30%、含水比40%、28日養生）
- 写真-4.4.15 C A S 材処理灰のSEM像（添加率30%、含水比60%、28日養生）

## 第5章

表-5.1 安定処理土の強度発現を定式化した結果概要

表-5.2 安定処理土の材料特性および固化処理条件と適合回帰式

## 第1章 緒 論

### 1. 1 研究の背景と問題点

近年、経済の成長および産業の発達により建設事業は飛躍的に増加し、それに伴い大量の掘削泥土、残土などの不良土が発生している。また、各種工場から排出される産業廃棄物も量的に増大し、また、質的に複雑化してきている。これらは主として海面や谷地部の埋立、または宅地造成などに処分されてきたが、最近では、埋立計画の減少や、環境汚染の防止などから、特に、大都市周辺においては適当な地域に処分地を求めることが年々困難になってきている。

これらの不良土や産業廃棄物の処理・処分の際には、その成因、発生状況および品質に応じた適切な対応が要求される。

わが国は多雨多湿の温帯性気候であり山地は急峻で剥奪量は世界の平均に比べ約10倍のオーダー（10mm／年）となっている<sup>1)</sup>。その結果、流出土砂量は莫大な量となり、水の営力により運搬された細粒土が軟弱地盤を形成している。平野部の広い範囲に軟弱地盤として分布している沖積層は、約2万年前の最後の氷河期（ウルム氷期）後の海進により、現在より数十m高くまで海面が上昇したときに、微細な土粒子がおぼれ谷に堆積したものであり、その利用に際しては強度および圧縮特性などの面で大きな問題をもっている。そして、その他にも高含水比で高塑性の火山灰質粘性土や、破碎性粒子を多く含んでいるまさ土、およびシラスなどの特殊土が各地に分布し、取扱いが困難で有効利用のしがたい地盤も多くみられる。

また、現在、下水などの地下埋設管などの工事によって発生する掘削残土はそのほとんどが廃棄処分されており、埋戻し特性の優れている山砂などの良質土を用いて復旧している。昭和52年度中の大阪市の推定によると、道路工事で発生した掘削土量約160万 $\text{m}^3$ のうち、埋戻しなどに有効利用されたのは約16%であり、残りの84%は廃棄処分されている<sup>2)</sup>。しかし、最近では発生土の処分地の確保が困難となり、また、埋戻し用の良質な材料も少なくなっている。その結果、高価な材料の使用や遠隔地からの搬入を余儀なくされており、この傾向は益々顕著になってきている。そこで、処分地の確保、経済的効果、土砂運搬に伴う交通公害の防止、資源の有効利用、環境保全などの観点より現地で発生する不良土を安定処理して使用することが認識され注目されてきている。工事現場から発生する掘削残土のうち、良質土はそのまま無処理で埋戻し材料として使用されるが、一般に、掘削残土の多くは高含水比であり、夾雑物や細粒が多く、そのままでの再利用は困難である。そこで、これらの土をなんらかの処置や安定処理を施した後に埋戻し材料として使用することが考えられる。現在、建設省や種々の機関ではこの分野の技術開発を積極的に進めており、再処理プラントを稼働させ、試行している<sup>3)・4)</sup>。

一方、近年、各種の産業で発生する廃棄物は質的に複雑化し、量的に膨大化しており、これらの処理、処分問題は緊急の課題となっている。これらの産業廃棄物の建設材料としての有効利用をシステム化するためには、将来も多量の発生が継続して予想されること、発生場所が一定の地域に限定されていないこと、品質の変動が小さく管理が容易なこと、処理コストが処理後の需要価格に比べ大きな差がないこと、環境汚染などの公害のないことなどを確立する必要がある。そこで、建設省は昭和56年より5年間をかけて各種の産業廃棄物の有効利用を図るため総合技術開発プロジェクトを発足させ、産業廃棄物の処理、加工技術の開発と再生材の品質評価基準あるいは使用基準をとりまとめている<sup>5)</sup>。また、鳥居<sup>6)</sup>は産業廃棄物として高炉・転炉スラグや石炭灰とセメントとの硬化反応について微視的な見地より詳細に検討を行っている。そして、その成果として、これまで処理・処分が困難であった廃棄物を建設材料その他へ有効利用する可能性が増加している<sup>7)</sup>。しかしながら、わが国の主な廃棄物の発生量と処分の現状についてまとめた表-1.1.1によると、それらの有効利用されている割合は大変少ない値である。

一般に、産業廃棄物はその発生プロセスに応じて種々の物理・化学特性を有しており、有害物質の観察とともに硬化反応に貢献する元素や、その溶出性に着目し、その特性を活かした安定処理方法を考える必要がある。

土質安定処理の方法には処理対象土の含水比と土粒子間隙を減少させる物理的方法と、処理対象土と安定材の化学反応を期待する化学的方法がある。一般に、安定材を用いる化学的な安定処理は物理的な処理と異なり土自身の性質を変化させるものであり、安定化の形態は次の二つに大別される。

- (1) 安定材と処理対象土の相互作用の結果、硬化反応物を生成し安定処理効果を発揮する。
- (2) 安定材と処理対象土の相互作用はほとんどなく、安定材自身の固化作用の結果、土粒子と土粒子を結合して安定処理効果を発揮する。

しかしながら、多くの安定処理の場合、程度の差こそあれ処理対象土はその化学成分に応じた固化性状を内包しており、また、養生方法などにより硬化反応も異なるため、実際は(1)と(2)の強度発現に貢献する程度が問題となる。そこで、安定処理の配合設計の際には処理対象土の物理・化学的性質を調べ、その硬化活性に適応した安定材の種類や添加率および養生方法などを決定することが大変重要になる。

安定処理の一つの方法として、石灰やセメントを添加して土を固化することは古くから行われていた。

石灰が建設用の材料として使用された歴史は極めて古いが、古代ギリシャやローマでは石灰石を焼いた消石灰と火山灰を混ぜ、石造のアーチや道路（路盤）を造ったことが知られている。



また、エジプトでは5000年以上前に築造されたピラミッドに焼き石膏と砂とを混ぜたモルタルが、石と石の隙間の接着材として使われている。さらに、中国では秦の始皇帝時代の万里の長城や黄河の堤防の建設時に黄土を石灰により安定処理し、そして、古代インドのダムの建設では粘土を石灰モルタルで固めている。一方、わが国では平安時代に中国から伝わった三和土と呼ばれる土と石灰と砂の三種類の材料を用い、水で練った後に叩き固めたものが土間などに使用されている。

近代に至っては1802年にフランスにおいて粘土と混合してグラウトとして用いられ、1920年代には米国で道路建設に使用され始め、その後、テキサス州やルイジアナ州の高速道路の路盤および滑走路など全米各地に広がった。それらは特に、粘性土の施工性改善が主たる目的であった。一方、わが国では昭和30年頃より道路の路盤工や鉄道道床の噴泥防止工として用いられ、その後、関東ローム、シラス、ヨナなどの安定処理に有効なことが明らかにされた。そして、昭和40年代には土質安定処理材料として活発に用いられた。その主なものとしては昭和41年の国鉄東海道新幹線工事や昭和42年日本道路公団の東名高速道路大和工事の軟弱地盤の改良などがあり、改良効果の実績をあげている<sup>8)・9)</sup>。

セメントは1824年英国で発明された。そして、1885年にはドイツで注入材料として用いられ、1917年には土砂とセメントとを混合して土質安定処理に用いられている。また、ソイルセメントは1930年代にアメリカで研究され、主に道路の路盤材料として用いられた。一方、わが国では1915年長崎県松島炭坑の立坑掘削において注入に使用され、第二次大戦後にはソイルセメント工法として注目され、各地の国道工事で使用されている<sup>10)</sup>。

現在、これらの石灰・セメント安定処理工法は処理土の締固めを伴う浅層処理から、パイル工法やかくはん工法として締固めを伴わない深層の地盤にも広く適用されており、今後、地中深く構造物を建設する場合や地質の悪い条件、および厳しい環境条件における対応が重要になってきている。また、最近では電子顕微鏡やX線回折装置などの分析機器の性能の向上が安定処理土の硬化反応メカニズムの解明に効果を発揮しており、安定処理工法の進展充実に大きな貢献をしている。そして、これまで固化処理の困難であった高有機質土、超軟弱粘性土および硬化活性の低い材料など、処理対象土の特性や処理目標に応じた種々の安定材が開発され、きめ細かい施工が行われている。さらに、安定処理施工機械の高性能化により安定材の混合性能の向上、および適用土質および範囲の拡大に基づいて、地盤改良への土質安定処理工法の採用が多くなっており、それに応じて理論に裏づけされた合理的な配合設計の確立が期待されている。

## 1. 2 研究の目的と概要

近年、その処理・処分が大きな問題である軟弱粘性土、建設残土や産業廃棄物を石灰・セメント系安定材により固化し、付加価値を高め、建設材料として有効に利用することができれば、処分地の確保の問題と合わせ、省資源の観点からも大変有意義なことである。

一般に石灰・セメント系安定材による安定処理工法において、処理対象土の品質は極めて幅広く、また、強度発現の反応機構も複雑であり、未だ十分明らかにしていない。そのため、安定処理工法の適用の際には、処理対象土を用い、多くの種類の安定材や添加率により試験配合を行って配合設計をしており、多大の経費、労力と時間を費やしている。

本論文は自然の不良土や産業廃棄物などを石灰・セメント系安定材を用いて固化し、建設材料としての有効利用の可能性を検討するものである。また、固化処理した試料の経時的な強度の増加傾向の定式化を試み、その処理効果を定量的に比較し、最も効果的な処理方法を検討している。そして、安定処理対象試料の特性、および固化処理条件と強度発現の関係を追究し、合理的な安定処理の配合設計、および品質管理の方法について提案するものである。

次に、5章から構成されている本論文の内容について述べる。

第1章では現在、大きな社会的問題になっている不良土および産業廃棄物の処理・処分について本論文の背景と目的について述べている。

第2章では各種の対象試料に対する安定処理の研究で共通的に行われている分析機器の特徴や使用目的、および実験方法と、その手順について述べ、また、新しい安定材として用いた炭酸アルミネート系塩材料について説明している。そして、安定処理した試料を道路用材料として用いる場合と、軟弱粘性土の固化やトラフィカビリティを改善する場合の基準値や目安を示し、養生の経過に対する強度の発現傾向を示す回帰式の説明をしている。さらに、処理した試料の強度増加に関係深い硬化反応機構と反応生成物について述べている。

第3章ではわが国の特殊土のうち、まさ土、へどろ、沖積粘土、九州桜島の降下火山灰を安定処理した場合の強度特性を追究し、それらの有効利用の可能性について明らかにしている。これらの処理土はそれぞれの粒径、含水比や硬化活性が大きく異なるものである。

第3章1節では水砕スラグを添加したまさ土の石灰安定処理の強度発現について検討している。

まさ土は風化の程度により異なるが、一般に砂質土であり、硬化活性の高い細粒分や粘土鉱物の少ない試料である。そのため、石灰による安定処理効果を高めるためには硬化反応を促進する副安定材を添加することが考えられる。そこで潜在水硬性を持つ水砕スラグを添加して石灰安定処理効果を追究する。ところで、水砕スラグの潜在水硬性による強度発現は処理土のA

ルカリ雰囲気などの処理条件に大きく影響される。そこで、本節では水砕スラグの粒径、突固めエネルギーおよび養生方法の違いなどの要因に対する処理効果の影響について検討し、水砕スラグを添加したまき土の石灰安定処理の最適配合設計、および処理条件を提案する。

第3章2節ではへどろや沖積粘土のような有機物含有量が多く、含水比の高い軟弱粘性土に対し石灰・セメント系安定材を用いて固化し、路床などの建設用材料としての可能性を追究している。

有機物、特にフミン酸は処理土の強度発現を阻害する作用があり、石灰・セメント系の安定材を用いた処理土の強度発現にフミン酸が与える影響について検討する。また、石灰・セメント系の安定材に石膏や水砕スラグを添加することにより固化効果に与える影響についても明らかにしている。さらに、安定処理土を実際の現場に適用する場合を考え、乾燥と湿潤の繰り返しによる細粒化と崩壊性の二つの面より処理土の耐久性を検討している。

第3章3節では九州桜島の降下火山灰の代表的な種類の黒灰を石灰・セメント系安定材により固化処理し、あるいは、焼結処理を施して建設材料としての有効利用の可能性について検討している。

火山灰は噴出する際のガスの雰囲気により反応性は異なるが一般に硬化活性の高い試料である。この火山灰の固化処理において安定材の種類、火山灰の粒径や供試体成形時の含水比の違いが強度発現に及ぼす影響について追究している。さらに、安定材を添加して固化成形した火山灰を高温で焼成することにより、ブロック、ボード材やタイルなどの高強度材料として利用するため、安定材の添加量や焼成温度の違いが強度や透水性などの工学的性質に与える影響を検討している。

第4章では産業廃棄物として水硬性粒度調整スラグ、水砕スラグ、フライアッシュ、コンクリート微粉末、製紙焼却灰などを固化処理した場合の強度特性を追究し、それらの有効利用の可能性について明らかにする。これらの産業廃棄物は粒径や物理的性質などは異なるが硬化活性の高い反応性元素を含有するなど硬化反応の促進にそれぞれの特徴を持っているものである。

第4章1節では道路用材料として広く用いられている高炉徐冷スラグの一種である水硬性粒度調整スラグの品質と固化特性について調べている。また、養生初期の強度発現の促進と高強度材料としての利用を目的として、安定材の種類や養生方法の違いによる安定材を添加した水硬性粒度調整スラグの強度特性を追究している。

水硬性粒度調整スラグには水砕スラグが含有されており、そのため潜在水硬性を持っている。水砕スラグの強度発現は試料中の水分量が重要であり、養生方法などが大きく影響する。一方、道路用材料としてのJIS規定<sup>11)</sup>では、その強度特性が一軸圧縮強度で規定されているが、供試体の養生方法については定められていない。そこで養生中の供試体の水分量が異なる種々の養

生方法による強度発現の違いについて検討を行った。

また、水硬性粒度調整スラグに安定材として石灰、水砕スラグや石膏を添加して硬化反応を促進し、養生初期の強度増加と高強度材料としての有効利用の可能性を追究している。

第4章2節では将来その排出量が増大すると予想されているフライアッシュおよび固化特性の高い粉状の水砕スラグを石灰・セメント系安定材を用いて処理し、有効利用の可能性について検討している。

スラグについてはすでに有効利用が確立されており、ここでは2章2.1で説明する新しい安定材の炭酸アルミネート系塩材料を用いた固化効果について検討している。

一方、石炭灰の微粉末であるフライアッシュの良質のものはセメント原料やコンクリートの混和材として利用されているが、本研究ではあまり良質でないために有効利用がほとんどされていないフライアッシュを用いている。フライアッシュは原料炭や燃焼方式により固化特性が異なるためここでは国内炭と国外炭から得られた二種類のフライアッシュの物理的、化学的性質による強度発現傾向の違いに注目し、特に、硬化反応性元素のフライアッシュ粒子からの溶出性などによる強度特性への影響について検討している。また、施工性の選択の幅を広げるため固化処理したフライアッシュの締固めの有無による強度増加の違いについても明らかにする。

第4章3節ではコンクリート廃材から再生骨材を生産するときに発生するコンクリート微粉末を石灰・セメント系安定材で固化し有効利用の可能性を検討する。

コンクリート微粉末に対し、安定材添加量の比較的少ない場合（3～12％）では道路用材料としての適用を考え、添加量の多い場合（約40％）ではコンクリート二次製品のような高強度材料としての可能性について検討している。そして、より高度な利用方法として、高強度が得られた配合を土質安定材料として利用する可能性についてローム土を用いて検討している。さらに、コンクリート微粉末の改良目標強度に応じた安定材の選定および配合と、安定材の最適添加率を推定している。

第4章4節では製紙後の排水処理の際に発生する繊維質のペーパースラッジを焼却した残渣である製紙焼却灰に対し、石灰・セメント系安定材を用いて安定処理を行い建設材料などへの有効利用を目的として固化特性を追究する。

製紙焼却灰はその化学成分により硬化活性の高い試料であり、そのため安定材添加率や成形時含水比を変化させて強度発現傾向を検討している。また、現場での施工性を考え、固化処理した製紙焼却灰の加水混合から打設までに長時間を要する場合など、硬化反応が始まった後の繰り返しが固化効果に与える影響について追究している。

第5章では3、4章で得られた結果を総括するとともに今後の問題点について述べ、本論文の結論とする。

以上述べた 3、4 章の安定処理においては、いずれも固化効果を比較検討するために普通ポルトランドセメントと炭酸アルミネート系塩材料を用いている。また、3 章 3. 2 の軟弱粘性土を用いた安定処理では、特に、軟弱地盤用特殊セメント系安定材を用いて固化効果を比較している。

また、建設材料などへの有効利用の可能性を主として強度特性より、そして、硬化反応のメカニズムを微視的な面から X 線回折、電子顕微鏡による観察、X 線マイクロアナライザーによる元素分析および pH 試験などを行って検討している。さらに、安定処理土の養生に伴う強度の発現傾向を 2 章 2. 2 で述べる回帰式により定式化し、安定処理土の強度発現の比較、品質管理および長期強度の推定に用いている。

## 参 考 文 献

- 1) 阪口豊、高橋裕、鎮西清高：日本の地形、科学、Vol. 46, No. 4, pp. 223～247, 1976.
- 2) 三瀬貞、山田優、佐々木三男、戸島輝行：道路工事における掘削残土の再利用に関する一研究、土と基礎、Vol. 27, No. 9, pp. 13～20, 1979.
- 3) 浅川美利：現場発生土の有効利用、土と基礎、Vol. 29, No. 11, pp. 9～12, 1981.
- 4) 亀井敏雄、清水茂成、田中脩二郎：建設廃材（発生残土）の有効利用、土木学会誌、Vol. 66, No. 10, pp. 35～40, 1981.
- 5) 建設省：建設事業への廃棄物利用技術の開発概要報告書、1986.
- 6) 鳥居和之：産業副産物の土質安定処理への有効利用に関する基礎的研究、京都大学学位請求論文、1985.
- 7) 嘉門雅史、友久誠司、壺内賢一：各種廃棄物のセメント系固化材による有効利用、セメント技術年報41、セメント協会、pp. 98～101, 1987.
- 8) 土質工学会：土質工学における化学の基礎と応用、土質工学会、pp. 164～165, 1978.
- 9) 土質安定処理工法委員会、日本石灰協会：石灰による土質安定処理工法、日本石灰協会、pp. 1～3, 1970.
- 10) 土質工学会：地盤改良の調査・設計から施工まで、土質工学会、p. 207, 1984.
- 11) 日本規格協会：道路用スラグ、JIS A 5015, 1979.

表-1.1.1.1 主な廃棄物の発生量と処分の現状 1)

	石 炭 灰	高 炉 ス ラ グ	コンクリート廃材	浚渫汚泥 (ヘドロ)
発 生 量	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 54年 1,256千 t</li> <li>・ 57年 3,850千 t</li> <li>・ 65年 5,820千 t</li> <li>・ 70年 7,730千 t</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 56年 24,800千 t</li> <li>・ 57年 22,680千 t</li> <li>・ 58年 22,940千 t</li> <li>・ 59年 24,800千 t</li> <li>・ 将来 現状とほぼ同じ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 49～52年 108千<sup>m</sup>³ (建設省直轄工事)</li> <li>・ 50年 2,800千<sup>m</sup>³ (1都3県の全工事)</li> <li>・ 将来 30,000～70,000千<sup>m</sup>³ (全国)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 55年 969千<sup>m</sup>³ (建設省所管事業)</li> <li>・ 56年 942千<sup>m</sup>³ (建設省所管事業)</li> </ul>
処 分 の 現 状	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ セメント混和剤、炭鉱埋廃坑埋戻し材として有効利用 20%</li> <li>・ 80%</li> <li>・ 廃棄又は埋立処分</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 路盤材として有効利用 42%</li> <li>・ セメント原料として有効利用 22%</li> <li>・ 骨材として有効利用 9%</li> <li>・ 肥料その他として有効利用 12%</li> <li>・ 自家使用 15%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 路体盛土護岸根固めとして再利用 30%</li> <li>・ 70%</li> <li>・ 廃棄</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 大部分が臨海埋立地での処分。</li> <li>・ 59年 918千<sup>m</sup>³ (建設省所管事業)</li> <li>・ 60年 969千<sup>m</sup>³ (建設省所管事業)</li> </ul>
処 分 上 の 問 題 点	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 将来発生量が増大した時の処分地不足。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 有効利用がほぼ軌道にのり、処分以上の問題は少ない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 処分地不足。</li> <li>・ 処分距離の増大。</li> <li>・ 交通騒音。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 臨海埋立地の減少による処分場所不足。</li> </ul>

## 第2章 研究の手法と安定化機構

### 2. 1 研究の手法および分析機器

#### (1) 使用した安定材

従来の土質安定処理は反応性イオンである $\text{Si}^{4+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ が土粒子から溶出し、添加された $\text{Ca}^{2+}$ などの成分との反応によって硬化反応物を生成して固化していたため、反応速度は処理対象土の性質や状態により大きく相違し、また、養生初期の強度増加はあまり期待できなかった。また、高含水比粘性土や高有機質土の固化処理においては、従来の石灰やセメントだけを用いた安定処理では効果が上がらないものが少なくなかった。そこで、最近では石灰・セメント系安定材が多く開発され、それらは処理対象試料に対し確実な強度の増加と硬化反応の促進を目標とし、従来から用いられている石灰やセメントに硬化反応を促進する元素を含有した薬剤などを副添加した安定材である。

本研究では安定材の違いによる処理土の固化効果の比較のため、一般に用いられている普通ポルトランドセメント（以後、セメントと呼ぶ）と石灰・セメント系安定材の一種である炭酸アルミネート系塩材料（Carbonated Aluminate Salt、以後、C A S 材と呼ぶ）を多くの処理対象試料に用いている。

C A S 材は水酸化カルシウム、セメントを主成分として炭酸ナトリウム、硫酸アルミニウムなどを添加して新しく開発された安定材であり、次に示す特徴を持っている<sup>1),2)</sup>。

- (7) 試料土とC A S 材の混合直後より、C A S 材中の $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Si}^{4+}$ が反応し、養生初期の段階にエトリンガイトを生成する。その結果、処理対象試料中の過剰な水分が結晶化されて固定し、また、有機物含有量の多い処理対象試料の強度発現も期待できる。
- (4) 中・長期の養生にわたりポゾラン反応を活性化する。
- (7) C A S 材中の $\text{CO}_3^{2-}$ により安定処理土中の硬化反応に寄与しない過剰の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を炭酸化し、反応性のない安定化した鉱物である $\text{CaCO}_3$ に変える。
- (1) C A S 材はセメントや石灰に比べ、中性領域に近い性質のため、安定処理土周辺に与える影響が少ない。

#### (2) 一軸圧縮試験および供試体の作成方法

一軸圧縮試験の供試体は、土質工学会基準、「安定処理土の突固めによる供試体作製方法」（JSF E 811）<sup>3)</sup>あるいは「安定処理土の締固めをしない供試体作製方法」（JSF E 821）<sup>4)</sup>に



準じて行った。その手順は次のとおりである。

#### (7) 試料および混練

試料に含まれる粗大夾雑物を除去し、所定の量の試料、安定材、水などをホバート型ソイルミキサーに入れて約5分間混練する。

この際、混合試料や安定材がソイルミキサーのボウルの内面やパドルに付着して混合状態が不完全になる恐れのある場合は、へらなどを用いて混合試料を切り返すなどの補助操作を加える。

#### (イ) モールドへの充填

底部および側壁内部に樹脂フィルムを当てたコンクリート用二つ割りモールド（直径5cm、高さ10cm）をあらかじめ用意しておき、混合した試料を3層に分けてただちに充填する。

この際、締固めを行わないものについては、処理土中の空隙が完全になくなるように床に打ちつけて振動を加え、締固めを行うものについては、JIS A 1210の第一方法と同じエネルギー（ $5.6\text{cm}\cdot\text{kgf}/\text{cm}^3$ ）でランマーの自由落下で締固めた。

#### (ウ) 養生

モールドに充填後、処理土表面からの水分の蒸発を防ぐために、処理土の上面をポリエチレンフィルムで完全に覆い、恒温恒湿室（室温20℃、湿度90％）にて養生する。また、処理土の強度の発現時期に応じて供試体の上端面を平滑に仕上げた。

#### (エ) 一軸圧縮試験

所定の期間養生を行った供試体は1%/minの歪制御で一軸圧縮試験を行った。

なお、以上に述べた(7)～(エ)以外の方法で行っている場合はその都度、実験概要の項で説明を行っている。

### (3) 硬化反応性元素の水溶性試験

土質安定処理において化学的な反応による強度発現は安定材自身の固化作用と、安定材と処理対象試料との相互作用による硬化反応物の生成により発揮される。その際、固化効果を最も有効に発揮させるためには処理対象試料に適合した安定材を選択するとともに、安定処理対象試料の硬化活性が重要となる。そこで、実験に用いた処理対象試料の硬化活性を調べるため反応性元素の水溶性試験を土質工学会基準、(JSF T 10)「土の水溶性成分試験のための試料液調整法」<sup>5)</sup>に準じて行った。

(7) 安定処理対象試料を乾燥質量で100.0g正確に計り、これを2000mlのポリエチレン製の試験瓶に移す。

- (f) 蒸留水をメスシリンダーを用いて正確に1000mlとり、(7)の試薬瓶中に加え密栓する。  
次に、約5分間手で瓶を激しく振とうさせる。なお、アルカリ雰囲気中での溶出性を調べるための実験では振とう前に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を添加し、pHを12.5に調整している。
- (g) (f)の振とう液をろ過し(ろ紙 No.5 B)、透明なろ液を採取する。なお、硬化反応性元素の溶出のため静置する時間は蒸留水を加えた2時間後(これを混合直後とする)と、7日後の二種類であり、7日間の静置中は毎日一度、約5分間振とうさせている。
- (h) ろ過して得られたろ液を用いて原子吸光分析によりCa、Si、Al、S成分の定量を行う。

#### (4) 分析機器とその特徴

##### (7) X線回折分析(X-ray Diffraction Analysis)<sup>6)</sup>

X線を試料に照射するとX線は結晶物質により回折され、そのときの回折角度と回折強度はその結晶物質に特有なものであり、それらを計量することにより結晶物質の構造を知り、また、結晶物質を定量することができる。この分析により処理対象試料および反応生成物の結晶性物質の同定と定量が可能となる。

##### (f) X線マイクロアナライザーおよび蛍光X線分析

(Energy Dispersive X-ray Analyzer ; E D X A、X-ray Fluorescence Analysis)<sup>7)</sup>

X線マイクロアナライザーおよび蛍光X線分析は、電子線およびX線を照射した際に、試料中に含まれている各元素より発生する特性X線を検出することにより、微小領域の元素分析を行う装置である。X線マイクロアナライザーを電子顕微鏡(SEM)と組み合わせて使用したSEM-EDXA分析を行うことによりSEMの画面に映った任意の微小領域の測定が可能である。これらにより処理対象試料や処理土に含まれる元素の組成の解明や定量、反応生成物の同定が可能となる。

##### (g) 熱重量分析および示差熱分析

(Thermogravimetry, Differential Thermal Analysis)<sup>8)</sup>

この分析は物質を均一な速度で加熱する際に生じる物理的および化学的变化を、質量および熱量の変化としてとらえるものである。熱重量分析は脱水、分解および化学反応による質量の変化より試料中の物質の含有量を測定するものである。また、示差熱分析は物質の相変化や熱分解、転移や酸化反応などの熱的变化を基準物質と比較することにより物質の種類とその含有量を測定するものである。この分析では結晶性に関係なく反応生成物の同定と定量が可能である。

##### (h) 走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope ; SEM)<sup>9)</sup>

波長の短い、細く絞った電子線を試料上で走査させ、照射面から発生する2次電子を検

出し、一方、陰極線管（CRT）内の電子ビームを蛍光面に走査させて試料の表面を観察するものである。反応生成物の含有量が数％なければその検出が不可能なX線回折および示差熱分析に比べ、走査型電子顕微鏡は個々の処理土表面の微視的構造の観察が可能であり、硬化反応物の生成状況（形状、寸法）の把握が可能となる。

#### （ⅳ）原子吸光分析（Atomic Absorption Analysis）<sup>10）</sup>

フレーム中の原子はその熱により、その最外殻の電子が励起されて高いエネルギー準位に移る。各々の元素には数多くのエネルギー準位があり、それに応じて固有の多くの電子遷移が起こり、また多くのスペクトル線が得られる。この固有の両準位間のエネルギー差に等しい光子を照射したときのエネルギー吸収量の違いにより元素の含有量を計るものである。原子吸光分析は検体を溶液にする必要があるが、低濃度の分析が可能であり、硬化反応性元素の定量に用いられる。

## 2. 2 安定処理土の改良目標および強度発現の定式化

### （1） 安定処理土の改良目標

従来の土質安定処理は主として道路・滑走路の路床や路盤の強度増加を目的として行われていた。しかし、利用目的や社会的ニーズに合わせ従来の材料規定に拘束されず現地で発生する不良土を安定処理して、これをより有効に利用しようとする概念の変化が生じている<sup>11）</sup>。

安定処理の対象試料としては現場の不良土や品質基準を満足しない材料および有効利用が困難な産業廃棄物などであり、多くの場合、次の目的で行われる。

（ⅴ）水分の除去による強度および支持力の増大

（ⅴ）土粒子の団粒化による物理的性質の改善と施工性の改良

（ⅴ）土粒子相互の接着と土粒子間隙の減少による飛散・流出の防止、強度発現および変形・透水特性の改善

（ⅴ）土粒子と安定材の化学的結合による有害物質の溶出および悪臭の防止

土質安定処理の改良目標は処理対象土の材料特性を把握した上で、処理土の改良目的、用途、養生方法、改良期間、使用可能な施工機械、工費および周辺の環境条件などにより各々の工事毎に決定される。

道路用材料としての安定処理土の強度の改良目標はアスファルト舗装要綱<sup>12）</sup>によると路床ではCBRで、また、路盤では一軸圧縮強度により基準を定めている。

路床では現場の土の設計CBRが2未満の場合は置換工法や石灰、セメントなどの安定処理

工法により3以上に改良することが規定されている。そして、路床改良した層のCBRの上限は20に定められている。

また、高速道路の路床の基準としては、一般道の下層路盤に相当する上部路床がCBR10以上、下部路床で5以上となっている。しかし、安定処理の配合設計などに用いる品質の目安としては上部路床が20～40であり、下部路床は10～20である<sup>13)</sup>。

一方、路盤の安定処理工法は強度の増加と塑性指数を改良して規格を満足させることにある。下層路盤には、山砂利や山砂などの一般に施工現場の近くで経済的に入手できる修正CBRが20以上、塑性指数6以下の材料を使用することになっている。しかし、これらの規定をみたす現地材料を入手できない場合は、セメント、石灰などで安定処理をして下層路盤として用いることができるとされている。また、上層路盤には粒度調整碎石、水硬性粒度調整スラグや歴青安定処理、セメント安定処理、石灰安定処理などの工法が用いられ、セメントおよび石灰安定処理の基準は表-2.2.1のとおりである。

次に、軟弱粘性土は掘削および浚渫した状態では一般に非常に含水比が高く、また強度も小さいため、埋立て処分はもちろん建設機械のトラフィカビリティや処分地への運搬も不可能なことが多い。そこで、へどろや汚泥の改良では処理土の用途および適用性を考慮して、固化強度の目標値は一軸圧縮強度で次の値を目安とすることができる<sup>14)</sup>。

#### (7) 運搬性能の改善

へどろや汚泥を運搬するための目標強度は、舗装、未舗装の部分の比が8:2程度の道路を、平均時速30km/hで約3時間トラック運搬するときに支障をきたさない条件を考えると、一軸圧縮強度は約0.3kgf/cm<sup>2</sup>である。しかし、改良強度に大きければつきを示すことが多いので0.5～1.0kgf/cm<sup>2</sup>をとる例が多い。

#### (イ) トラフィカビリティの改善

へどろ上を建設機械の走行を可能にするための目標強度は建設機械の種類や大きさによるが、0.5～1.0kgf/cm<sup>2</sup>を確保すれば十分である。

#### (ウ) 原位置固化処理

有害物質を含むへどろや汚泥を原位置に封じ込めて、流出の防止、悪臭の発生を防止するための目標強度は1.0kgf/cm<sup>2</sup>程度と考えられる。

なお、処理土に地盤の支持力が要求される場合は地盤全体のすべり破壊、改良地盤内の内部応力および未改良地盤の支持力の計算により目標強度を求める必要がある。

以上述べてきた安定処理土の改良目標強度は施工主体や改良工種に応じて、様々な試験方法により基準値や目標値などを定めており、あまり統一はされていないようである。そして、安定処理の配合設計は一般に室内実験の結果を基にしており、室内実験強度に対する現場強度の

比は一般に0.30～0.65として安定材の添加量を決定している<sup>15)、16)</sup>。

## (2) 回帰分析による強度発現の定式化と安定材の最適配合および最適処理条件の推定

一般に石灰・セメント系安定材による安定処理工法において、対象となる試料の改良目的や用途によって目標強度や、その強度に到達するまでの期間が定められる。しかし、処理対象試料の品質は極めて幅広く、また、強度発現の反応機構も複雑であり、安定材の種類や添加量および養生方法などの種々の条件により安定処理効果は大きく変化する。そのため、実際の安定処理土の現場への適用においては、処理対象試料を用いて多くの種類の安定材や添加率により試験配合を行って決定しており、多大の経費、労力と時間を費やしている。

一方、現場の施工に際しては室内試験により決定された配合設計に従って施工するのであるが、安定処理土を路床や路盤に適用する場合、アスファルト舗装要綱では表-2.2.1に示したように7日および10日後のCBRと一軸圧縮強度を規定している。しかし、実際の施工では工程上、強度の確認をするだけの放置日数をとることは不可能であるため、実験室で行った処理土と同様の強度発現をするものと仮定し、強度の割増率を加算して施工を進めている。そのため得られる改良強度の信頼性が小さく、道路の供用後に安定処理土の強度が不足していることも少なからず生じている。

安定処理土の強度発現については、三瀬<sup>17)</sup>は掘削残土を対象とした安定処理土のCBR増加量の予測を処理土のレキ分や乾燥密度などから試みている。また、嘉門<sup>18)</sup>らはセメント系安定処理土の施工後、短時間のうちに長期改良効果の推定を行う迅速施工管理法(Knowledge-Working法)の提案をしており、安定処理土の強度発現が双曲線的な傾向のあることを明らかにし、安定処理土の品質管理に先鞭をつけた。そして、三嶋<sup>19)</sup>は安定処理土の強度発現は養生温度に支配されるとして、養生温度や処理土の凍結による強度発現への影響を考え、養生後の強度の推定を行っている。しかし、安定処理工法において、処理対象試料の種類や状態をはじめ、安定材などの強度に影響する因子は多く、また、硬化反応機構は複雑であるため処理土の強度発現を推定することは非常に困難なことである。

一般に、同じ処理対象試料、安定材および養生方法で安定処理を行うと多少のばらつきはみられるが強度特性は十分再現性のあるものと考えられる。そこで、養生日数に対する強度発現の関係を定式化することによって短期養生強度による長期養生強度の推定が可能となり、養生初期に強度不足の処理土を発見することができ、安定処理土の品質管理に使用できる。また、適用式を相互に比較することにより、安定材の種類や添加量、および養生方法の違いによる固化効果を定量的に比較することが可能となり、安定処理土の改良目標値に応じた最適配合の設計に役立つとともに、同じ固化特性を持った処理対象試料に対しての配合設計に応用できるも

のと考えられる。

種々の処理対象試料に対する安定処理工法において、養生と強度の関係は強度発現に影響する因子が多いため単純な式では表すことは難しい。しかし、ここでは養生の経過に対して安定処理土の強度が徐々に増加するものと仮定し、養生に伴う強度増加の程度を、表-2.2.2に示す5つの回帰式を用いて強度試験の結果に適用し、相関係数の比較により最も適合する回帰式を決定している。ここで、回帰分析に用いた変数は、Xが養生日数（日）で、Yは一軸圧縮強度（kgf/cm<sup>2</sup>）であり、変数X、Yは表-2.2.2に示す変数変換を行った後、次の式を用いて回帰係数と相関係数の計算を行っている。

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \\ \bar{Y} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} S_{xx} &= \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \\ S_{yy} &= \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \\ S_{xy} &= \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} B &= \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \\ A &= \bar{Y} - B \bar{X} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} \cdot S_{yy}}} \quad (2.4)$$

ここで、 $X_i$ ：養生日数（日）

$Y_i$ ：一軸圧縮強度（kgf/cm<sup>2</sup>）

$n$ ：データ数

$A, B$ ：回帰係数

$r$ ：相関係数

以下に、これら5つの式についてその特徴を述べる。

(1)式  $Y = A + B X$

最も基本的な直線回帰式である。安定処理は養生の経過とともに強度が増加すると仮定しているため一般にA、Bは正の数である。切片Aは養生初期の一軸圧縮強度を示している。その後の強度は養生日数に比例して増加し、勾配Bは養生の経過に伴う強度増加の程度を示している。そして、勾配Bが小さいほどAの値（養生初期強度）の強度への影響は大きい。

長期間の養生にわたり、一定の割合で強度が増加する処理土に適用できる。しかしながら、実際には強度増加には限度があり、本式の適用については養生日数の適用範囲を定める必要がある。

$$(2)式 \quad Y = A + B \cdot \log X$$

式(1)の養生日数(X)が対数になったものであり、対数曲線が基本形である。勾配Bは対数曲線の倍率であり、切片AはY方向の移動量である。養生日数(X)が1日のときは強度はAとなる。

養生初期に硬化反応の大部分が終了し、養生の経過に伴う強度の増加は比較的小さい処理土に適用できる。

$$(3)式 \quad Y = A \cdot 10^{BX}$$

単回帰式に書き換えると、

$$\log Y = \log A + B X$$

となり、安定処理土の強度発現傾向の関係より係数A、Bは正の数である。その結果、養生日数Xの経過に従い、Yの強度も増加し、その増加の程度は徐々に大きくなる。そこでこの回帰式は養生初期に比べ、長期にわたる強度発現が顕著な処理土に適用できる。また、この式の適用限界については式(1)と同様、養生日数の範囲を定めておく必要がある。

$$(4)式 \quad Y = A X^B$$

単回帰式に書き換えると、

$$\log Y = \log A + B \log X$$

となり、グラフは原点と点(1, A)、すなわち1日強度がAを通る放物線となる。長期の強度は勾配Bの値により決定される。安定処理の強度発現傾向の関係より係数A、Bは正の数である。Bの値が1のときは式(1)の直線回帰になり、 $B > 1$ のときは養生の経過とともに強度増加率は増大する。一般には $1 > B > 0$ の範囲となり、養生日数(X)の増加に伴い強度増加率は減少しながら強度(Y)の値も増加する。そして、長期の強度増加率は式(2)、および次に述べる式(5)と比較して大きなものであり、長期にわたる硬化反応性の高い処理土に適用される。

$$(5)式 \quad Y = \frac{X}{A + B X}$$

X軸を $1/X$ 、Y軸を $1/Y$ に変換することにより直線回帰が可能となる。単回帰式に書き換えると、

$$\frac{1}{Y} = B + A \frac{1}{X}$$

となり、変換したY軸の切片はBである。安定処理土の強度発現傾向の関係より係数AとBは正の値となる。長期養生を行った強度の推定値は $1/B$ であり、Bの値が小さいほど養生初期から長期にかけての強度が大きくなることになる。一方、勾配Aが小さくなるほど養生初期の強度増加、および養生に伴う強度の増加の程度は大きくなり、早く長期強度の $1/B$ に収束する。

従って養生初期に強度の発現が顕著であり、長期の養生に伴う強度増加の少ない処理土に適用できる。

以上の5種類の回帰式を用いて養生の経過に対する強度発現の関係の定式化を行う。

また、処理対象試料や安定材が変わると当然回帰式も変化するが、処理対象試料と安定材との相互関係で適用できる回帰式が決定されると、変数変換により直線の式に直すことができ、その結果、養生初期の2つの養生日数に対する強度試験のデータが得られると長期養生後の強度を推定することが可能になる。

## 2. 3 安定処理土の反応機構と反応生成物

安定処理の強度発現を検討する上で、安定材と処理土の反応機構の解明および反応生成物の同定は非常に重要である。処理対象試料の品質は極めて幅広く、また、強度発現の反応機構も複雑であり、安定材の種類や添加量および養生方法などの種々の条件により安定処理効果は大きく変化する。安定材を添加する固化処理の特徴は土を化学反応の相手として利用し質的に変化させる点にある。安定材はそれ自身と処理対象試料の細粒分から溶出する反応性元素と結合して硬化反応物を生成し、その反応生成物は成長とともに処理土の空隙を充填し、ち密化を促進し、粒子相互の結合材となり処理土全体の剛性を高めるものである。

次に、各々の硬化反応についてその特徴を述べる<sup>20), 21), 22), 23)</sup>。なお、ここでは表示を簡単にするため次の略号を用いる。

C : CaO、S : SiO<sub>2</sub>、A : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、H : H<sub>2</sub>O、F : Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、G : CaSO<sub>4</sub>

### (1) セメントの水和作用とポゾラン反応

セメントの水和作用による安定処理土の強度発現、および反応過程はセメントモルタルと同様のものと考えられる。セメントは加水により自硬性を発揮する材料であり、CaO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>などの混合物を、その一部が熔融するまで焼成することにより得られる。その主な化合物は3CaO・SiO<sub>2</sub> (C<sub>3</sub>S)、2CaO・SiO<sub>2</sub> (C<sub>2</sub>S)、3CaO・Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C<sub>3</sub>A)、4CaO・Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>・Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (C<sub>4</sub>AF) から成っており、硬化反応生成物は次に示すとおりである。なお、これらの反応のうち、処理対象試料中の可溶性シリカやアルミナ成分と石灰との硬化反応を一般にポゾラン反応と呼んでおり、石灰安定処理で最も強度増加に貢献するもの

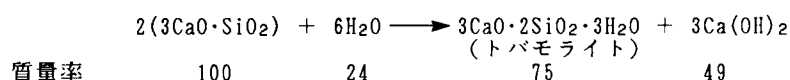


であり、そして、長期にわたり強度増加が継続する反応でもある。また、粘土鉱物ではアロフェン、加水ハロイサイトなどを多く含有する火山灰性粘性土やモンモリロナイトは硬化活性が大きく、一方、イライトやクロライトおよび結晶性のよいカオリナイトなどは硬化活性が小さいといわれている。

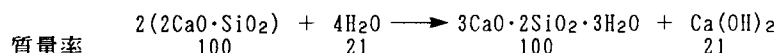
(7) ケイ酸石灰水和物 ( $\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$  生成物: C S H 系生成物)

$\text{C}_3\text{S}$  (アリット) と  $\beta\text{-C}_2\text{S}$  (ベリット) の水和反応により C S H 系反応生成物とその約 65%、21% の質量の遊離石灰 ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) が生成し、さらにその遊離石灰と粘土鉱物、および廃棄物中の可溶性シリカとの反応で C S H 系生成物が生成することになる。

それらの反応および質量の比率は次のようである。



質量率                      100                      24                      75                      49



質量率                      100                      21                      100                      21

一方、安定材あるいは処理対象試料に水砕スラグを含有する処理土ではスラグ粒子から  $\text{SiO}_2$  が溶出し、1～2週間養生で  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot x\text{H}_2\text{O}$  のゲル状物質を生成する。その後の硬化反応により  $\text{C}_{0.5\sim 1.5}\text{SH}_x$  (CSH(I))、 $\text{C}_{1.5\sim 2.0}\text{SH}_x$  (CSH(II))、 $\text{C}_x\text{SH}_y$  などの生成物が生ずる。

安定処理土の強度発現は主としてこの C S H 系生成物の生成によるものであり、C S H 系生成物の絡み合いによる網目構造の発達にともない個々の土粒子が連続的に結合され、緻密な土粒子構造が形成される過程で安定処理土の強度の発現が得られると考えられている。ただし C S H 系生成物は一般に結晶性が悪く、X線回折などによる同定は困難である。

(4) アルミン酸石灰水和物 ( $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$  生成物: C A H 系反応生成物)

アルミン酸石灰水和物はセメント中の  $\text{C}_3\text{A}$  (アルミン酸三石灰) および  $\text{C}_4\text{AF}$  (セリット) の主要な水和生成物であり、石膏が共存する場合にはアルミン酸硫酸石灰水和物に変化することが知られている。結晶形態はそのほとんどが六角板状であり、電子顕微鏡による観察においても十分同定が可能であり、また C S H 系生成物と異なり結晶性も良好であることから、X線回折により同定が可能である。

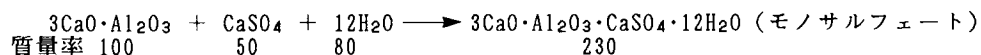
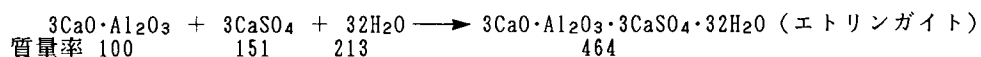
また、安定材に水砕スラグを用いた処理土では消石灰のアルカリ刺激により  $\text{Al}_2\text{O}_3$  を溶出し、1～3日で  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot x\text{H}_2\text{O}$  初期反応物のゲルを生成する。さらに、珪酸二石灰が水和・硬化して、遊離する消石灰などにより反応がくり返され、その反応生成物は  $\text{C}_3\text{AH}_{6\sim 12}$ 、 $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ 、 $\text{C}_2\text{AH}_8$ 、 $\text{CAH}_{10}$  などである。

(ウ) 加水ゲーレナイト水和物 ( $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$  生成物: C S A H 系反応生成物)

加水ゲーレナイト水和物は高炉水砕スラグの水和反応過程やフライアッシュのボゾラン反応過程で生成することが確認されており、処理土中の  $\text{SiO}_2$  が 4 ～ 8 週間で溶出し、 $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8 \sim 12\text{H}_2\text{O}$  が生成する。また、消石灰と粘土鉱物（カオリン、アロフェン、加水ハロイサイト）との反応においても生成することが認められている。処理土中のシリカおよびアルミナ分の反応性が顕著であり、石灰量が相対的に少なくなった場合に生じるとされている。そのため、比較的長期養生の処理土で観察される。結晶形態は C A H 系生成物と同様に板状結晶であるが、SEM-EDXA 分析において Si の存在に注目することにより同定が可能であると考えられる。

(エ) アルミン酸硫酸石灰水和物 ( $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaSO}_4-\text{H}_2\text{O}$  生成物: C A G H 系生成物)

アルミン酸硫酸石灰水和物は高硫酸塩型のエトリンガイト ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) と低硫酸塩型のモノサルフェート水和物 ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ) の二つに分けられるが、石灰および石膏の濃度が高い場合にはエトリンガイトが生成し、石灰と比較して石膏の濃度が低い場合にはモノサルフェート水和物が生成することが知られている。エトリンガイトはその化学組成式からわかるように、一分子中に 45% もの多量の結晶水を取り込んでおり、軟弱地盤の安定処理において主に含水比を低下させるとともに針状の形態をしており土粒子間を架橋することにより土粒子の移動を拘束し、処理土の剛性を高めるという面で効果のある反応生成物である。アルミン酸硫酸石灰水和物は、他の反応生成物と異なり構成元素として S を多く含んでいることから、SEM-EDXA 分析によって同定可能であり、またその結晶形態はエトリンガイトが針状結晶、モノサルフェート水和物が板状結晶をしていることから電子顕微鏡観察により両者を判別することができる。エトリンガイトおよびモノサルフェートの反応および質量の関係は次のとおりであり、エトリンガイトの反応水量の多いことがわかる。



(2) イオン交換作用および土粒子の団粒化

微細な粘土粒子の表面は一般に負に帯電しており、その表面には H、Na、K、Ca などの陽イオンが付着している。この粘土粒子に石灰を添加すると、添加した Ca と粒子表面に付

着している陽イオンとの交換が起こる。その結果、粘土粒子のまわりの電荷密度が変化し、粘土粒子は電氣的に引きつけやすくなり団粒化が起こる。この団粒化は処理土の物理的性質を改善し、液性限界の減少と塑性限界の増加により塑性指数を減少させ施工性の向上に役立つ。そして、この反応は安定材の添加後 2 日ぐらいで終わる。

(3) 生石灰の吸水、膨張、発熱反応

安定材として生石灰を用いるとその質量の約32%の水分と反応し体積は約2倍に増加する。その結果、処理土の含水比は低下し、体積膨張により回りの処理土を圧縮するため強度が増加する。また、この消化反応の際、生石灰はモルあたり15.6kcal発熱し、この温度上昇は処理土の含水比を低下するとともに石灰による硬化反応を促進する。

(4) 石灰の炭酸化反応

(1)、(2)で示したポゾラン反応やイオン交換反応に貢献しなかった処理土中の過剰の石灰は長期間にわたり処理土中および空気中のCO<sub>2</sub>と結合して炭酸カルシウムを生成する。この炭酸カルシウムは化学的に安定したものであり強度を発現する。まさ土のような硬化反応性の小さい処理対象土の強度発現はこの炭酸化反応の効果が大きいといわれている。

## 参 考 文 献

- 1) 赤井浩一、嘉門雅史、友久誠司：各種廃棄物のセメント系固化による有効利用について、pp.1～4, 1987.
- 2) 嘉門雅史、友久誠司、壺内賢一、S.Nontananandh：建設廃材としてのコンクリート微粉末の固化による有効利用について、材料、日本材料学会、Vol. 37, No. 422, pp. 8～13, 1988.
- 3) 土質工学会、土質試験基準検討委員会：安定処理土の突固めによる供試体作製方法、土と基礎、Vol. 36, No. 11, pp. 130～132, 1988.
- 4) 土質工学会、土質試験基準検討委員会：安定処理土の締固めをしない供試体作製方法、土と基礎、Vol. 37, No. 1, pp. 77～78, 1989.
- 5) 土質工学会：土質試験法、土質工学会、pp. 241～246, 1980.
- 6) 大野勝つ美、川瀬晃、中村利廣：X線分析法、共立出版、pp. 39～40, 1987.
- 7) 鳥居和之：産業副産物の土質安定処理への有効利用に関する基礎的研究、京都大学学位請求論文、pp. 241～316, 1985.
- 8) W. ウェンドランド著、笛木和雄、柳田博明、高橋洋一訳：熱分析法、産業図書、pp. 112～113, 1971.
- 9) 日本電子顕微鏡学会、関東支部：走査電子顕微鏡の基礎と応用、共立出版、pp. 3～4, 1983.
- 10) 鈴木正巳：原子吸光分析法、共立出版、pp. 1～6, 1985.
- 11) 浅川美利：表層地盤の改良、セメント・コンクリート、No. 391, pp. 22～29, 1979.
- 12) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱、pp. 2～20, 1982.
- 13) 渡辺崇博、市村正二、今川史郎：路床の安定処理に関する研究と高速道路における施工例、土と基礎、Vol. 29, No. 11, pp. 13～19, 1981.
- 14) セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル、pp. 116～117, 1985.
- 15) 森本恵二、大石喜代一、吾郷一房：ソイルミキサー車を用いた掘削土再利用工法の開発、Vol. 29, No. 11, pp. 27～34, 1981.
- 16) 喜田大三、久保博：へどろ対策工法、土と基礎、Vol. 29, No. 5, pp. 53～60, 1981.
- 17) 三瀬貞、山田優、佐々木三男、戸島輝行：道路工事における掘削残土の再利用に関する一研究、土と基礎、Vol. 27, No. 9, pp. 13～20, 1979.
- 18) 嘉門雅史、脇村嘉郎：路盤・路床のセメント系安定処理の迅速施工管理法の開発について、第21回土質工学研究発表会、pp. 1781～1782, 1986.
- 19) 三嶋信雄：現場における安定処理混合物の強度予測、土と基礎、Vol. 25, No. 1, pp. 31～

38, 1977.

- 20) 有泉 昌：石灰安定処理の機構、土と基礎、Vol.227, pp.9～15, 1977.
- 21) 土質工学会：地盤改良の調査・設計から施工まで、土質工学会、pp.207～209, 1984.
- 22) 日本石灰協会、石灰安定処理委員会：石灰による軟弱地盤の安定処理工法、鹿島出版会、pp.14～16, 1983.
- 23) D.W. Czernin著、徳根吉郎訳：建設技術者のためのセメント・コンクリート化学、技報堂出版、pp.39～45, 1979.

表－2.2.1 路盤に用いる安定処理材料の品質

工 法	路盤の種類	P I	一軸圧縮強度
セメント安定処理	上層路盤	9以下	7日強度、30kgf/cm <sup>2</sup>
	下層路盤	9以下	7日強度、10kgf/cm <sup>2</sup>
石灰安定処理	上層路盤	6～18	10日強度、10kgf/cm <sup>2</sup>
	下層路盤	6～18	10日強度、7kgf/cm <sup>2</sup>

表－2.2.2 回帰式の種類および変数変換

式の番号	線 形	関 数 形	変数およびその変換		直線型の式
			X	Y	
1	直 線	$Y = A + B X$	X	Y	$Y = A + B X$
2	対数曲線	$Y = A + B \cdot \log X$	$\log X$	Y	$Y = A + B \log X$
3	指数曲線	$Y = A \cdot 10^{BX}$	X	$\log Y$	$\log Y = \log A + B X$
4	放物線	$Y = A X^B$	$\log X$	$\log Y$	$\log Y = \log A + B \log X$
5	双曲線	$Y = \frac{X}{A + B X}$	X	$\frac{X}{Y}$	$\frac{X}{Y} = A + B X$

表-2.3.1 硬化反応生成物とその特徴

分類	反応生成物	X線回折 d値 (Å)	結晶形状	示差熱分析の特徴	備考
ケ イ 酸 石 灰 水 和 物	$C_2S \cdot yH_2O$ $x=0.83 \sim 1.33$ $y=1.52 \sim 2$ (トベルモライトゲル)	3.04、2.80、1.80、	不規則板状 のり巻状 葉巻状		d値のピーク強度は弱い。
	CSH (I)	3.07、2.81、1.83、5.48、2.07	薄い、崩れた箔 状	800~900℃付近で発熱反応がみ られる。	シリカゲルと石灰との反応により生成する。 トベルモライトゲルより結晶度はよい。
	CSH (II)	3.07、9.80、2.80、1.83、2.00	繊維状、箔状、 板状		セメントと過剰水との反応により生成する。 CSH (I) より結晶度は低い。
	トベルモライト	3.08、11.3、2.98、2.82、1.84	網目状		
	熱重量分析において375~650℃の間の直線的でゆるやかな減量勾配がある。 X線回折ピークは現れないことが多く、反応生成物の同定は困難である。				
ア ル ミ ン 酸 石 灰 水 和 物	$C_2AH_6$	5.16、2.32、2.04、4.47、3.37	正方晶系	315~360℃付近で吸熱反応。	CSHより結晶度が高い。
	$C_4AH_{13}$	7.90、3.99、2.86、2.46、1.66	六方晶系板状	200℃付近で吸熱反応がある。 DTA曲線は $C_2AH_6$ に類似し ている。	セメント硬化体や一般の安定処理土中に存在 する。 石灰とスラグとの反応で石灰過飽和状態の時 に生成する。
	$CAH_{10}$	7.16、14.7、5.37、4.73、3.70	六方晶系板状		アルミナセメント硬化体の主要成分である。
	$C_2AH_8$	10.7、5.36、2.86、2.54、2.39	六方晶系板状		
	CSH系反応生成物より結晶度が高く同定は比較的簡単に行える。				
ゲ レ ナ イ ト	$C_2AS \cdot SH_2$ (加水ゲレーレナイト)	12.5、4.17、2.86、6.24、2.62	薄い板状	220℃付近で吸熱反応がある。	高炉水砕スラグやフライアッシュの水和時に 生成する。 アロフェンの石灰反応時に生成する。
ア ル ミ ン 酸 石 灰 水 和 物	$C_2AG_2H_{12}$ (エトリンガイト)	9.73、5.61、4.69、3.88	六方晶系針状	110~180℃および285℃付近で 吸熱反応がある。 結晶水の75%は110℃付近で失 われる。 DTA曲線は $C_4AH_{13}$ に類似 している。	膨張セメントおよび石膏を多く含有する石灰 やセメント処理土の硬化体中に存在する。 硫酸およびアルミン酸は他の成分により置換 され石灰の硫酸化合物および固溶体を形成す る。
	$C_2AGH_{12}$ (モノサルフェート)	9.0、4.48、4.00、2.87	六方晶系板状 比較的大きな結 晶		非晶質の酸化アルミニウム反応性粘土、高炉 水砕スラグおよびセメントにより生成する。
	安定処理土中の $SO_3$ イオンがエトリンガイト生成反応に消費されると、より少ない $SO_3$ の量で済むモノサルフェートが生成される。				

### 第3章 特殊土の安定処理に関する研究

#### 3. 1 水砕スラグを添加したまさ土の石灰安定処理に関する研究

##### 3. 1. 1 概 説

わが国は狭い国土のうえ複雑な地形、地質を形成しており、各地に一般の土と比較し、取扱いにおいて問題となる土が多く散在している。これらの土は特殊土と呼ばれ、地域性が強く、成因や性質が特異なものであり、それらは地盤および材料としての有効利用の阻害要因になっている。

本州西部や四国を主として、ほぼ全国に分布しているまさ土は関東ロームや九州のシラスなどと並んでわが国の代表的な特殊土といわれている。まさ土は「花崗岩質岩石（花崗岩、花崗閃緑岩、石英斑岩など）の結晶性深成岩、半深成岩、またはこれと同質の片麻岩が風化してその場所に残留している残積土、および、これからもたらされた崩積土である」と定義されている<sup>1)</sup>。その性質としては、まさ土が風化途上の岩石であるため、母岩の種類および風化の程度によって物理的、化学的に極めて不安定であり、粒子破碎を起こしやすく、水に対する安定性の低い特徴が挙げられる。そこで、これらの工学的性質を改善することによって、まさ土を有効に利用することは大きな意義がある。

石灰を用いた土質安定処理はセメント安定処理工法とともに、これまでの数多くの研究や実績により工法として確立されている。一般に、石灰安定処理土の改良効果は主としてポズラン反応によるものである。ポズラン反応は処理土中の可溶性シリカやアルミナが石灰溶液との反応により不溶性の水和物を形成するものであり、試料土中に存在するハロイサイトなどの活性の高い粘土鉱物によって著しく処理効果をあげることができる。そのため、セメント安定処理工法が砂質土に適しているのに比べ、石灰安定処理工法は処理土中の細粒分（以下、 $75\mu\text{m}$ 以下の粒子を細粒分と呼ぶ）含有量が15～20%より多い粘性土に対して大きな処理効果をあげている<sup>2)</sup>。

石灰安定処理へのまさ土の適用については、松尾ら<sup>3)、4)</sup>の研究が特筆される。彼らはまさ土の工学的性質を風化特性の面より追究し、X線回折や電子顕微鏡による微視的な見地よりその有効性を明らかにしている。また、渡辺ら<sup>5)</sup>は処理土の強度発現について、養生温度および凍結作用を受けた処理土と強度発現の影響について明らかにしている。一方、砂質系の土であるまさ土は細粒分、特に硬化活性の高い粘土鉱物が少なく石灰安定処理効果は不十分であると言われている。そこで、澤<sup>6)</sup>はまさ土中の細粒分を増量することにより強度増加が得られるこ



とを示し、その強度増加のメカニズムはポゾラン反応だけでなく消石灰の炭酸化が大きな要因であるとしている<sup>7)</sup>。しかし、強度増加の促進には土中の細粒子と石灰が多量に必要となり、元来、細粒分の少ないまさ土において細粒分の増加や多量の石灰の添加は経済性および施工性の点で大きな問題がある。

本節の目的は、風化の程度によって差異はあるが、反応性粘土鉱物の少ないまさ土に対し、有効な石灰安定処理方法を検討するものである。また、まさ土は石灰と反応する細粒分が少ないため反応の相手としてケイ酸二石灰、ゲーレナイト、アノサイトを主成分とした潜在水硬性のある水砕スラグを副安定材として添加し、その粒度、突固めエネルギーおよび養生方法の違いによる安定処理効果も併せて検討している<sup>8), 9), 10), 11)</sup>。

### 3. 1. 2 材料特性と実験概要

#### (1) 使用材料

本研究に用いる試料は六甲山系横尾山より採取したまさ土である。まさ土はその風化の程度により性質が大きく異なるが、ここで使用するまさ土はかさ比重が真比重とあまり変わらず、また強熱減量が2.8%と低い値を示しており、あまり風化が進んでいないものと考えられる。蛍光X線分析の結果によると、Si、Al、K、Fe、およびTi、Caの元素が確認された。また、X線回折では一次鉱物である $\alpha$ -石英、微斜長石および曹長石の大きなピークが見られ、粘土鉱物のカオリナイトとモンモリロナイトのピークはわずかなことから風化が進んでいないことを裏づけている(図-3.1.1)。試験には粒径4.75mm以下のまさ土をロサンゼルスすりへり試験機により破碎し、細粒分の量を約10%と約20%に調整したものを用いた。表-3.1.1、2、図-3.1.2はその化学成分、物理的性質と粒度加積曲線である。

#### (2) 実験概要

試験に用いた試料の分類記号、配合および養生方法などは表-3.1.3のとおりである。使用した安定材は消石灰(以後、石灰と呼ぶ)であり、副安定材として軟質の水砕スラグ(粗粒率3.2、以後、粒径2.5mm以下と呼ぶ)と、それを粉碎した粒径が0.85mm以下(写真-3.1.1)および75 $\mu$ m以下の細粒の三種類を用い、その硬化活性を検討した。その物理的性質は表-3.1.4であり、化学成分を表-3.1.5に示す。そして、石灰と水砕スラグの配合比はまさ土の乾燥質量に対する百分率で示している。

供試体は最適含水比(図-3.1.3)に調整した試料をハーバード小型突固め試験機(直径約3

cm、高さ約7cm)により成形した。突固めエネルギーはJIS A 1210の第一方法と同じ $E_{c1}=5.6 \text{ cm} \cdot \text{kgf}/\text{cm}^3$ と、その2倍の $E_{c2}=11.2 \text{ cm} \cdot \text{kgf}/\text{cm}^3$ の2種類とした。

養生方法は供試体中の水分状態の異なる4種類で行った。気乾養生は供試体成形後に供試体を実験室内に放置して置くものであり、供試体は急激に乾燥し、数日で含水比は約1%程度にまで低下する。恒温恒湿室内養生(以後、湿潤室養生と呼ぶ)は供試体を温度20℃、湿度95%に保たれた室内に放置するもので、循環送風式のため含水比は徐々に減少する傾向にある。また、パラフィンコーティング養生(以後、パラフィン養生と呼ぶ)はパラフィンで密封した供試体を恒温恒湿室内で養生するものであり、含水比の変化はほとんどみられない。そして、恒温恒湿箱内養生(以後、湿潤箱養生と呼ぶ)は供試体を温度20℃、湿度95%に保たれた湿潤箱内に置くものであり、この装置は霧状の水分の散布により湿潤状態を保っており、供試体の表面は常に湿っている状態である。

強度試験は所定日数養生後に一軸圧縮試験を行うとともに、反応生成物の追跡をX線回折、示差熱分析、熱重量分析および電子顕微鏡により行った。

### 3. 1. 3 締固めエネルギーおよび養生方法の違いによる強度特性

#### (1) 低エネルギーで成形した安定処理特性

図-3.1.4は細粒分10%のまき土に石灰を20%、未破碎水砕スラグを0、2、5、10%添加した記号A-3の一軸圧縮強度を養生日数ごとにプロットしたものである。また図-3.1.5は水砕スラグを10%加えた試料に石灰を5、10、20%添加したもの、および石灰添加率10%で水砕スラグ無添加のものである。これらによると長期の気乾養生供試体を除いて養生日数の経過に従い強度が増加することが明らかである。特に、湿潤養生を行った供試体の強度増加が大きくなっている。これは湿潤状態を持続することで石灰によるポゾラン反応などの硬化反応がより効果的に促進された結果である。しかし、水砕スラグの添加量の差による固化効果の違いは少なく、水砕スラグ無添加のものと長期強度を比較すると、水砕スラグを添加した供試体は湿潤養生で約 $1 \sim 4 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ 大きな値となっているが、気乾養生では逆に強度は小さくなっている(図-3.1.4)。また図-3.1.5では石灰添加量に応じて強度は伸びているものの、石灰添加量10%で比較すると水砕スラグ無添加のものに比べ水砕スラグを10%添加すると強度は約1/2の値となり、水砕スラグを添加した効果がみられないことがわかる。

以上の結果、石灰によるアルカリ雰囲気中で発揮される水砕スラグの潜在水硬性がほとんど発現されなかったことがわかる。すなわち、水砕スラグが粗大粒子のため供試体中にまんべん

なくゆきわたらないことと、多孔質で角ばっているため供試体の密度が低下した結果、強度が逆に低下したものと考えられる。

次に、水砕スラグを破碎して0.85mm以下の粒子とし、まさ土の細粒分を20％に調整した試料で実験を行った結果が図-3.1.6である。石灰添加率10％、56日養生後の供試体に注目すると、試料の細粒化により、強度は気乾養生、湿潤養生ともに $3.4\text{kgf/cm}^2$ から $4.9\sim 5.0\text{kgf/cm}^2$ となり約1.5倍の増加を示している。そして、その他の配合の供試体でもほぼ同様の傾向を示している。しかし、水砕スラグ無添加のものと比べると強度はまだ若干低い値になっており、水砕スラグを添加した効果はみられない。

## (2) 高エネルギーで成形した安定処理特性

水砕スラグを添加したまさ土の石灰安定処理土において、締固めエネルギーを増加して乾燥密度を増大し、強度発現特性を追究した。供試体は作成時の突固めエネルギーをJIS A 1210の第一方法の2倍である $E_{c2}=11.2\text{cm}\cdot\text{kgf/cm}^3$ に増加して実験を行った。図-3.1.7は記号B-3およびCの養生日数に対する強度変化を示している。

突固めエネルギーを $5.6\text{cm}\cdot\text{kgf/cm}^3$ で成形した場合、石灰添加率10％の供試体の強度は30％のものに比べて明らかに低くなっている。すなわち、石灰添加量が不足のため固化効果が充分ではなく、反応性が高いといわれている湿潤養生における長期強度の増加もみられない。しかし、突固めエネルギーを $11.2\text{cm}\cdot\text{kgf/cm}^3$ と高くすると、石灰添加率が10％の供試体においても高強度になることがわかる。そして、強度増加の傾向および値は石灰添加率30％の記号Cとよく似ており、突固めエネルギーの増加は石灰量の増加と同じ固化効果があることを示している。

図-3.1.8は水砕スラグを10％添加し、 $E_{c2}=11.2\text{cm}\cdot\text{kgf/cm}^3$ で成形した供試体の養生日数と強度の関係である。これによると突固めエネルギーが $5.6\text{cm}\cdot\text{kgf/cm}^3$ の図-3.1.6に比べ養生日数の経過に伴う強度の増加と、突固めエネルギーの違いによる強度の増大が顕著である。また、図-3.1.7との比較により水砕スラグの添加による強度増加も明らかである。水砕スラグおよび石灰添加率と4週間養生後の強度との関係を整理したものが図-3.1.9、10である。これらの図で明らかなように、 $E_{c1}=5.6\text{cm}\cdot\text{kgf/cm}^3$ では配合比の違いによる強度の変化がほとんどみられない。しかし、図-3.1.9に示す $E_{c2}=11.2\text{cm}\cdot\text{kgf/cm}^3$ のものでは特に湿潤養生において、石灰添加量が増えるに従って強度は明確に増加することがわかる。しかも、スラグ添加量の増大につれ単位石灰添加量当りの強度増加は大きくなっている。そして、スラグ添加量が0％でも石灰添加量の増加に従い強度は発現され、石灰添加量10％では約 $10\text{kgf/cm}^2$ を示している。また、図-3.1.10によると、全く同様に各石灰添加量に対し、スラグ添加量の増加に伴って強度が増加していることがわかる。しかし、石灰が無添加では水砕スラグ添加量を増加しても強

度の増大はなく、約2～5 kgf/cm<sup>2</sup>ではほぼ一定の値になっている。以上の結果により、石灰の添加および増量は水砕スラグのもつ潜在水硬性を発揮するのに適したアルカリ雰囲気を作り、単位量当りの水砕スラグの固化効果を増大させる。しかし、石灰を添加しない供試体では水砕スラグに硬化反応性がなく、強度増加はみられない。すなわち、供試体の強度発現に直接関係するものは石灰であり、水砕スラグは石灰の存在により初めて固化効果を発揮するものであり、その効果は石灰とほぼ同じ程度であることがわかった。

一方、低いエネルギーで突固めた供試体は配合比に関係なく強度も低く、むしろ若干ではあるが水砕スラグ量の増加により強度低下の傾向さえみられる。図-3.1.11は供試体中の粗粒子（まさ土と水砕スラグの75μm以上の粒子）を除いた体積に占める細粒子（75μm以下の粒子と石灰）の割合を次式で示す充填率を表わしたものである。

$$\text{充填率(\%)} = \frac{(\text{まさ土および水砕スラグ中の75}\mu\text{m以下の粒子の体積}) + (\text{石灰の体積})}{(\text{供試体体積}) - (\text{まさ土および水砕スラグ中の75}\mu\text{m以上の粒子の体積})} \times 100$$

これによると水砕スラグ量の増加により充填率が低下すること、すなわち、供試体中に空隙と水の量の和が増加したことを示している。表-3.1.6は記号A、Bの各供試体の乾燥密度である。細粒分の増加および突固めエネルギーの増加によって乾燥密度は増大している。まさ土の石灰安定処理土の乾燥密度と強度発現は密接な関係があることから、小さい突固めエネルギーの供試体では充填率が小さく、大きな強度が発揮されなかったものと考えられる。石灰と水砕スラグの硬化反応生成物は極く微細であり、供試体の密度を高め粒子間の間隔を少なくすることで強度が増大し、供試体密度の低下をもたらす水砕スラグの添加はかえって供試体の強度を低下させる原因となることが明らかになった。

### （3）養生方法の違いによる安定処理特性

水砕スラグを添加した石灰安定処理土がアルカリ雰囲気で固化効果を発揮することが明らかになった。ここでは供試体中の水分状態の異なる4つの養生方法、すなわち、気乾養生、湿潤室養生、パラフィン養生および湿潤箱養生について強度発現特性の違いについて追究し、最適な養生方法を検討する。

図-3.1.12は記号Dの石灰と75μm以下の水砕スラグをそれぞれ10%添加した供試体の養生日数に対する含水比の変化である。これによると、気乾養生と湿潤室養生の供試体は成形後1～2週間で含水比は1～2%となり、養生初期のうちに乾燥している。一方、湿潤箱養生では含水比は養生初期に減少するが、その後増加し、26週間養生後には成形時含水比を上回っている。また、パラフィン養生では養生日数の経過による含水比の変化はほとんどなく、若干増加

の傾向がみられる。これらの含水比の経時変化の違いにより、以後、気乾養生と湿潤室養生を低含水比養生、また、湿潤箱養生とパラフィン養生を高含水比養生と呼ぶことにする。

図－3.1.13は石灰を10%添加し、水砕スラグ無添加の供試体の養生日数に対する強度変化を示したものである。また、図－3.1.14は石灰と水砕スラグをそれぞれ10%添加したものである。これらによると、低含水比養生では4～8週間後に10kgf/cm<sup>2</sup>、20～25kgf/cm<sup>2</sup>とほぼ一定の値になり、その後の強度増加は少なくなっている。それに対し、湿潤箱養生では養生日数の経過に従い、特に水砕スラグを添加したものは大きな強度増加を示している。また、パラフィン養生では養生初期の強度は小さいが、長期にわたる強度増加が期待できる。

図－3.1.15, 16は26週間養生後の低含水比養生（気乾養生）と高含水比養生（湿潤箱養生）供試体の強度と安定材の配合との関係を示したものである。これらによると、いずれの養生方法とも安定材を加えない供試体と、水砕スラグだけを10%添加した供試体の強度はほとんど同じ値であり、75μm以下に粉砕した水砕スラグでもスラグだけの添加では強度発現は見られない。また、石灰だけを10%添加した供試体は無添加のものと比べ、石灰の添加により強度は増加しているが、高含水比および低含水比養生とも約12kgf/cm<sup>2</sup>とほぼ同じ値になっている。そして、その他の石灰と水砕スラグを併用した配合では添加量の増加に伴って強度が増加することは明らかであり、低含水比養生では石灰、水砕スラグとも無添加の供試体が3.5kgf/cm<sup>2</sup>であったものが、石灰、水砕スラグ各々5%添加のものでは9.5kgf/cm<sup>2</sup>、さらに各々10%添加のものでは19.0kgf/cm<sup>2</sup>に増加している。一方、高含水比養生での強度はそれぞれ2.0、36.0、73.0 kgf/cm<sup>2</sup>となり、安定材の添加による強度の増加は高含水比養生で顕著であることがわかる。また、石灰と水砕スラグの添加率の和が一定の供試体（図の影の部分は10%の場合）を比較してみると、低含水比養生では水砕スラグ量に関係なく、石灰添加量の増加により強度は大きくなっているのに対し、高含水比養生では石灰と同量の水砕スラグを添加した供試体の方が大きな強度を示している。

以上の結果、水砕スラグの添加による硬化反応の促進はアルカリふん囲気において供試体中の水分が成形時の最適含水比程度含まれている養生が必要であることがわかる。

### 3. 1. 4 まさ土の石灰安定処理の最適処理条件の推定

表－3.1.7は粗粒の水砕スラグを添加した記号Aの安定処理土の一軸圧縮試験の結果を供試体の養生日数（X）と強度（Y）の関係について回帰分析を行った結果である。ここで回帰に用いたデータは1, 3, 7, 14, 28, 56の養生日数について、それぞれ2～3個の強度試験の結果である。ここで適合回帰式番号は第2章2. 2に示した5種類の回帰式について相関係数

が0.9以上のものを高いものから順に示している。しかし、回帰係数などの比較のために使用する回帰式については0.9以下のものも示している。この表より気乾養生では全ての安定材の配合で次の回帰式(5)が適合していることがわかる。

$$Y = \frac{X}{A + B X} \quad (5)$$

ここで、Y : 一軸圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

X : 養生日数 (日)

A、B : 回帰係数

この式(5)の適合は供試体中の含水比が養生初期に低下して強度の増大が起こり、長期養生では反応水の不足のため強度増加がほとんどみられなかった結果である。一方、湿潤養生では全ての配合で式(1)～(5)の複数の式が適合しているが相関係数の平均値は、長期養生の強度増加が顕著であったため式(1)、式(4)が高くなっている。

$$Y = A X + B \quad (1)$$

$$Y = A X^B \quad (4)$$

ここで、安定材の配合の違いによる比較を行うために、多くの配合に共通で、相関係数の高い式(5)の回帰係数を水砕スラグ添加率の違いにより表したものが図-3.1.17, 18である。どちらの養生方法でも水砕スラグ添加量の増加により係数Bの値は増加傾向であり、処理土の強度が低下することを示している。しかし、石灰添加量の増加では回帰係数A、Bはともに減少しており、強度は増加している。次に、養生方法による違いをみると、気乾養生では係数Aが湿潤養生に比べて1桁小さい値になっており、養生初期の強度増加が顕著であったことを示している。一方、湿潤養生では係数Bが気乾養生より若干小さな値になっている。係数Bは少しの違いでも長期強度への影響が大きいことから、長期強度の発現が顕著であったことを表している。

次に、75μm以下の水砕スラグを用いた記号Dの回帰分析の結果が表-3.1.8である。これによると低含水比養生（気乾、湿潤室養生）では式(5)、高含水比養生（パラフィン、湿潤箱養生）では式(4)、式(5)が適合している。これらの養生日数と強度および安定材の配合に対する回帰係数の関係を図-3.1.19～22に示した。図-3.1.19によると式(4)では養生の経過に伴う強度増加が大きく、長期養生（182日）では適合式で得られた値より実験値の方が小さくなる傾向がある。一方、回帰係数では、硬化反応性のよい石灰および水砕スラグを併用した3種類の配合において高含水比養生（湿潤箱）を行った係数Bの値は低含水比養生のものより大きくなっており、養生の経過に伴う強度増加率が大きくなり、硬化反応が進んでいることを示している。しかし、反応性の低い石灰無添加の場合、低含水比養生（気乾）のB値が高含水比養生

(湿潤箱)のものを上回っており、強度増加に硬化反応が関係していないことを表している。一方、係数Aは全ての配合で気乾養生が湿潤箱養生より、しかも硬化反応性の高い配合ほど大きな値になっており、養生初期の強度増加は供試体の乾燥による影響が大きいことと、安定材を添加した処理土の養生初期の硬化反応性が大きいことを示している(図-3.1.20)。図-3.1.21, 22は同じ記号Dの実験結果を式(5)で表わしたものである。式(4)に比べ、養生初期強度が大きくなり、長期の強度増加率が小さくなっている。そのため養生初期では実験値の方が小さくなっているが、126日養生以後の強度は実験値とよく合っている。

次に、相関係数の違いがあり単純に比べることはできないが、水砕スラグの粒径の違いによる固化効果を比較するために同じ式(5)を用いた石灰と粗粒の水砕スラグを各々10%添加した記号A(表-3.1.7)の回帰係数と比べると、反応性の高い湿潤箱養生の係数Bの値は記号Aの場合の0.219に対し、記号Dの場合は0.011であり、水砕スラグの細粒化により約20倍の終局強度になることがわかる。また、安定材の配合が異なる処理土を式(5)で示した図-3.1.23では養生初期で実験値と一致していない部分も見られるが長期強度の推定や配合の違いによる比較を回帰係数で行うことが可能である。

以上の結果、まさ土のような粒状で細粒分が少なく、硬化活性の小さい処理対象土では石灰と処理対象土の硬化反応はあまり期待できないため、処理土の強度発現は水砕スラグのような副安定材と石灰の硬化反応が重要になる。そこで、強度発現の定式化は副安定材の硬化反応性の高さと処理土の養生環境に応じて決定されることが明らかになった。水砕スラグは潜在水硬性を有し、硬化反応性の高い試料であり、反応性の低い粗粒(粒径約2.5mm)のものでも養生中の処理土に水分が存在すると、硬化反応性イオンの溶出が可能となり、式(4)が適合する。しかし、反応性の高い細粒(粒径75 $\mu$ m以下)の水砕スラグを添加したものでも処理土中の水分の少ない養生を行うと長期にわたる強度増加が小さいため式(5)が適合する。しかしながら、式(4)は養生に対する強度増加が比較的大きいため養生日数の適用範囲には限界があり、長期強度の推定には式(5)が適している。そして、安定材の配合や処理土の養生方法の違いによる硬化反応性、ならびに養生期間に応じた複数の式を適用すると回帰式による品質管理や強度推定の精度が高くなり、一層の利用効果が図れるものと考えられる。

### 3.1.5 反応生成物の同定および定量と微視的構造

石灰安定処理土の強度発現のメカニズムを追求するうえで反応生成物の確認および把握は大変重要である。

本項では水砕スラグを添加した処理土のうち、比較的硬化反応性が低いと考えられる記号A

－ 3（粒径2.5mm以下の水砕スラグを添加した供試体）および硬化反応が最も進んでいると考えられる記号D（粒径75μm以下の水砕スラグを添加した供試体）についてX線回折、示差熱分析および電子顕微鏡観察の結果より考察する。

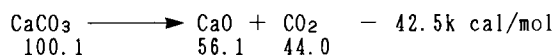
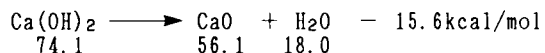
#### （１） X線回折による反応生成物の検討

図－3.1.24(a)はまさ土に石灰と水砕スラグを添加した直後の記号A－3の処理土である。まさ土の一次鉱物であるα－石英、微斜長石、曹長石などと、Ca(OH)<sub>2</sub>、および小さなピークのCaCO<sub>3</sub>がみられる。図－3.1.24(b)は供試体成形後、約2年間気乾養生をした供試体である。これによると石灰の炭酸化が進んでいるものの、まだ未反応のCa(OH)<sub>2</sub>が残っていることがわかる。このCa(OH)<sub>2</sub>の存在は未だ処理土の硬化反応が継続していることを示すとともに、供試体中のカルシウム分の炭酸化反応が起こりにくいことを示している。図－3.1.24(c)は約2年間湿潤養生後のものである。Ca(OH)<sub>2</sub>が消失し、炭酸化や、その他の硬化反応がより一層進んでおり、強度が増加したことを裏付けている。図－3.1.24(d)は(c)の試料の2μm以下の粒子を沈降分析により採取したものである。これによるとCaCO<sub>3</sub>の他にCaSO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>Oが確認できる。一方、CAHなどの硬化反応生成物のピークが存在するようであるが、発生量がわずかなためピークが小さかったり、主成分の大ピークの陰になったりして、その存在は定かではない。

#### （２） 示差熱分析による反応生成物の検討

図－3.1.25は石灰と水砕スラグを添加し、成形した直後の記号A－3、および養生後2年を経過した供試体の示差熱曲線（破線）および減量曲線（実線）を示したものである。図－3.1.25(a)は処理土を成形した直後の分析結果であるが、示差熱曲線ではCa(OH)<sub>2</sub>の脱水による500℃付近の吸熱ピークS<sub>1</sub>と、620～860℃のCaCO<sub>3</sub>の分解による吸熱ピークS<sub>2</sub>が認められる（573℃の吸熱ピークはまさ土中のα－石英、920℃は水砕スラグの発熱ピークである）。

ここでの反応は



で表わされ、H<sub>2</sub>OとCO<sub>2</sub>が消失して質量の減少を示す。減量曲線における吸熱ピークS<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>に対応するH<sub>2</sub>OとCO<sub>2</sub>の減量をA、Bとすると、供試体中のCa(OH)<sub>2</sub>とCaCO<sub>3</sub>の含有量Wはそれぞれの分子量より次式で計算でき、Ca(OH)<sub>2</sub>の含有量は、



$$W = \frac{74.1}{18.0} \times A = 4.12 \times A$$

となり、一方、 $\text{CaCO}_3$ の含有量は

$$W = \frac{100.1}{44.0} \times B = 2.28 \times B$$

となる。また、示差熱分析曲線のピーク面積は反応物の含有量と対応することから、それにより硬化反応物の生成量の推定も可能である。一方、図-3.1.25(b), (c)では375~650℃の間で直線的でゆるやかな勾配 I をもっており、これは安定材混合直後の図-3.1.25(a)で認められなかったものである。この勾配はポゾラン反応物の一つである C S H 系反応生成物の吸着水の脱水のために生じ<sup>12)</sup>、この勾配の大きさを比較することによって C S H 系反応物の生成量が推定できる。これらの関係について実験結果をまとめたものが表-3.1.9である。これによると多少の誤差はあるが減量より求めた $\text{Ca(OH)}_2$ 、 $\text{CaCO}_3$ の量はピーク面積と一致している。そして、湿潤養生では消石灰がすべて炭酸カルシウムと C S H 系反応物やその他のものに変化しており、そして、気乾状態では未だ一部の消石灰が反応せずに残っていることがわかる。これらの結果については X 線回折においても確認されている。C S H 系反応物による減量曲線の勾配 I は湿潤養生の供試体が気乾養生のものに比べ約1.7倍であり、湿潤養生の方がポゾラン化が進んでいると判断できる。また、図には表わしていないが、2  $\mu\text{m}$ 以下の粒子による示差熱分析では150℃付近に二水セッコウが脱水して無水セッコウになる吸熱ピークが確認できた。

次に、最も硬化反応が進んでいると思われる記号 D のまさ土に石灰と水砕スラグを各々10%添加した供試体の結果が図-3.1.26である。これによると示差熱曲線と減量曲線の結果は記号 A-3 のものとよく似た傾向になっている。そして、この示差熱ピーク面積と試料の質量変化量より $\text{Ca(OH)}_2$ 、 $\text{CaCO}_3$ 、および C S H 系反応生成物の量を計算により求め、養生日数の経過に従って示したものが図-3.1.27~29である。図-3.1.27, 28によると低含水比養生では養生初期に $\text{Ca(OH)}_2$ が減少し、それに応じて $\text{CaCO}_3$ が生成されている。一方、湿潤箱養生は低含水比養生に比べると空気との接触が少なく炭酸化が遅れる。また、パラフィン養生では26週間養生供試体に被覆の不完全からか $\text{CaCO}_3$ が生成されている。これらの関係は X 線回折によってもほぼ同様の結果が確認されている。

図-3.1.29は375~650℃の間の質量減少勾配を示したものである。すべての養生方法とも8週間までに C S H 系の反応物が認められる。低含水比養生では $\text{Ca(OH)}_2$ の炭酸化により水砕スラグ表面に皮膜が形成され反応性が著しく低下し<sup>13)</sup>、8週間養生以後の C S H 量の増加はほとんどなく、4週間養生以後の強度が増加していない原因と考えられる。一方、高含水比養生供試体は養生とともに C S H 系反応物の生成量が増加し、 $\text{CaCO}_3$ の生成と合わせ長期の強度発

現の原因となっている。C S H系などの反応物の生成は石灰のアルカリ雰囲気によって水砕スラグから溶出された $Al_2O_3$ 、 $SiO_2$ や種々の反応性元素が土粒子の間隙に生成物を作る液相反応であり、そのためには供試体中の水分が重要な要素となる。また、それらの反応生成物は極めて微細な構造で土粒子の間隙を埋めているため大きな吸水能力や結合水をもっている<sup>14)</sup>。その結果、水分の吸収が可能な状態である湿潤箱養生において4週間養生以後の供試体含水比が増加したものと考えられる。

次に、水砕スラグの粒径の違いによる硬化反応性をC S H系反応生成物の減量の比較により検討を行った。養生日数などの条件は異なるが、表-3.1.9と図-3.1.29により熱分析に用いた試料の量を同じ83.4mgに換算すると、水砕スラグが粗粒の2.5mm以下では1000℃当りの質量減少量は気乾養生で0.97mg、湿潤養生で1.7mgに対し、水砕スラグの粒径が75 $\mu$ m以下のものでは気乾養生で1.9mg、湿潤室養生で2.7mgの減量となり、水砕スラグの細粒化がC S H系反応生成物の生成に貢献していることを示している。

図-3.1.30は熱分析試験より求められた $Ca(OH)_2$ と $CaCO_3$ の量より $Ca^{2+}$ イオンの量を計算した結果である。低含水比養生ではC S H系反応生成物などに变化した量を除いてほぼ一定値になっているのに比べ、高含水比養生では18週間後まで大きく $Ca^{2+}$ イオン量が減少し、それ以後は増加している。これは $CaCO_3$ の反応に使われた量以上に $Ca(OH)_2$ の $Ca^{2+}$ イオンが減少しており、養生初期においてC S H系やその他の反応物の生成が顕著であったことを示している。また、その後の増加はアルカリ雰囲気中における水砕スラグからの $Ca^{2+}$ イオンの溶出があったものと考えられる。

### (3) 電子顕微鏡による微視的構造の観察

写真-3.1.2は湿潤養生、写真-3.1.3は気乾養生の2年養生後のものである。湿潤養生では多くの部分に針状の生成物がみられる。また、六角板状、花卉状のものも点在し、箔状や微細な粒子の状の不定形生成物が土粒子表面を覆っている。気乾養生では針状の生成物は極く限られた部分でしかみられず、箔状や、微細な粒子の量も湿潤養生に比べると大変少なくなっている。これらの反応生成物はX線回折や示差熱分析の結果と考え合わせると、針状のものは二水セッコウと反応して生ずるエトリンガイト、六角板状のものは石灰が過飽和の状態で生ずるC A H系反応生成物、また、箔状および微細な粒子はC S H系反応生成物、 $Ca(OH)_2$ や $CaCO_3$ と思われる。

写真-3.1.4は石灰、水砕スラグをそれぞれ10%添加した記号Dの26週間養生後の電子顕微鏡写真である。写真-3.1.4(a), (b)の低含水比養生では微細粒子や箔状の $CaCO_3$ やC S H系反応生成物がみられ、極くわずかなではあるが棒状のエトリンガイトも認められる。そして、写真

－3.1.4(c)のパラフィン養生では網状のC S H系反応物の間にトゲ状、写真－3.1.4(d)の湿潤箱養生では棒状のエトリンガイトが試料一面にみられる。これらの反応生成物は高含水比養生において養生日数の経過に伴ない数多くみられるようになり、長期強度の発現に貢献しているものと考えられる。

### 3. 1. 6 本節のまとめ

石灰安定処理工法において、風化の程度の小さなまさ土は硬化活性の高い粘土鉱物が不足しており、ポズラン反応などの硬化反応による処理効果が期待できない。そこで潜在水硬性を持った水砕スラグを添加してその強度発現を追及し、また、水砕スラグの粒径、処理土の締固めエネルギーおよび養生方法の違いが一軸圧縮強度に及ぼす影響について検討した。

得られた結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 安定処理土の強度は乾燥密度と密接な関係があり、突固めエネルギーの増大は石灰量、および水砕スラグ添加量を増加したものと同様の強度発現を示し、安定材添加量が節約できる。
- (2) 安定処理土の硬化反応は試料からの $Al_2O_3$ や $SiO_2$ などの反応性元素の溶出に関係があり、その促進には安定材によるアルカリ雰囲気が必要であり、養生では安定処理土中の水分の存在が重要である。
- (3) 安定処理土の強度増大に最も関係する要素は石灰添加量である。水砕スラグの潜在水硬性は石灰の存在によって初めて強度発現に寄与し、その効果は石灰とほぼ同じ程度である。
- (4) 粗粒の水砕スラグの添加は硬化反応性が低く、また、処理土の乾燥密度が減少するため大きな強度増加は期待できない。しかし、水砕スラグを細粒化することにより硬化反応は飛躍的に大きくなる。粒径が2.5mm以下の水砕スラグを75 $\mu$ m以下に破碎することにより湿潤養生で長期強度は約20倍になる。
- (5) 安定処理土の養生に伴う強度発現は安定材の配合や処理土の養生方法の違いによる硬化反応性に応じて強度の発現傾向が異なる。しかし、養生時期などの適用範囲を考慮して複数の適した回帰式を選択することにより十分安定処理土の品質管理や長期強度の推定に利用できる。
- (6) まさ土のような硬化活性の小さい試料の安定処理では石灰の硬化反応の相手となる副安定材の硬化反応性が重要である。副安定材として水砕スラグを添加したまさ土の石灰安定処理において、反応性イオンの溶出を可能にする供試体中に水分が存在する養生方法を行うと長期強度の増加が顕著となり、

$$Y = A X^B \quad (4)$$

の回帰式がよく適合する。また、供試体が乾燥する養生では養生初期の強度発現が大きく、長期の強度増加がほとんど見られないため、

$$Y = \frac{X}{A + B X} \quad (5)$$

の回帰式で強度発現が表わされる。しかし、水砕スラグの粒径の違いによる回帰式の違いはみられず、それぞれの回帰係数を比較することにより安定処理効果を定量的に比較、検討することが可能である。

- (7) 硬化反応生成物は養生初期にエトリンガイトやC S H系反応生成物が生成し、そして、長期養生ではC S H系反応生成物、C A H系反応生成物や炭酸カルシウムの生成により強度の増加することが明らかになった。

## 参 考 文 献

- 1) 土質工学会マサ土研究委員会：マサ土の基本的性質とその取扱い指針、マサ土の基本的性質、pp.1～31, 1970.
- 2) 三嶋信雄：現場における安定処理混合物の強度予測、土と基礎、Vol.25, No.1, pp.31～38, 1977.
- 3) 松尾新一郎、宋栄焜：X線および電子顕微鏡による石灰安定処理土の構造的な研究、土木学会論文報告集、No.193, pp.59～68, 1971.
- 4) Matsuo, S. and Nishida, K. :The Properties of Decomposed Granite Soils and their Influence on Portland Cement Stabilization, Soil and Foundations, Vol.9, No.2, pp.35～43, 1969.
- 5) 渡辺崇博、市村正二、今川史郎：路床の安定処理に関する研究と高速道路における施工例、土と基礎、Vol.29, No.11, pp.13～19, 1981.
- 6) 澤孝平：まさ土の粒子破碎特性とその石灰安定処理に関する基礎的研究、京都大学学位請求論文、pp.90～128. 1981.
- 7) 松尾新一郎、宋栄焜、大藤進、中村嘉次：石灰による真砂土の土質安定に関する研究、石灰による土質安定工法に関する実験報告（第1報）、日本石灰協会石灰による土質安定処理工法委員会、pp.1～44, 1970.
- 8) 松尾新一郎、澤孝平、友久誠司：水砕スラグを添加したまさ土の石灰安定処理について、第37回土木学会年次学術講演会概要集第3部、pp.581～582, 1982.
- 9) 澤孝平、友久誠司：水砕スラグを添加したまさ土の石灰安定処理に関する実験的研究、明石工業高等専門学校研究紀要、No.25, pp.53～63, 1983.
- 10) 松尾新一郎、澤孝平、友久誠司：水砕スラグを添加したまさ土の石灰安定処理について（2）、第18回土質工学研究発表会概要集、pp.1581～1582, 1983.
- 11) 澤孝平、友久誠司：水砕スラグを添加したまさ土の石灰安定処理に関する実験的研究（その2）、明石工業高等専門学校研究紀要、No.26, pp.69～76, 1984.
- 12) W. ウェンドランド著： 笛木和雄、柳田博明、高橋洋一訳：熱分析法、pp.85～89, 産業図書, 1971.
- 13) 宮入英彦：高炉水砕スラグの実体、セメント・コンクリート、No.405, pp.46～49, 1980.
- 14) 野村高照、徳永良邦、榎戸恒夫、稲山邦彦、鈴木章平：高炉水砕スラグの硬化特性とその抑制策、製鉄研究、No.301, pp.19～28, 1980.

表－3.1.1 まさ土の化学成分 (％)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O
74.4	12.8	0.5	0.1以下	0.13	4.68	2.9	3.38

表－3.1.2 まさ土の物理的性質（細粒分10％）

比 重	2.58
かさ比重	2.41
強熱減量（％）	2.8
液性限界（％）	17.8
塑性限界（％）	17.2
砂分（75μm以上）（％）	87.0
シルト分（5～75μm）（％）	9.5
粘土分（5μm以下）（％）	3.5
D <sub>60</sub> （mm）	1.00
D <sub>30</sub> （mm）	0.335
D <sub>10</sub> （mm）	0.033
均等係数 U <sub>c</sub>	30.3
曲率係数 U <sub>c</sub> '	3.4

表－3.1.3 安定処理土の配合と養生方法

記 号	まさ土細粒分 （％）	石灰添加量 （％）	水砕スラグ添加量 （％）	突固めエネルギー （cm・kgf/cm <sup>3</sup> ）	養 生 方 法
A－1 2 3	10	5 10 20	0, 2, 5, 10 （粒径約2.5mm以下）	5.6	・室温の気乾 ・20℃95％以上の恒温恒湿室内
B－1 2 3	20	0 5 10	0, 5, 10 （粒径0.85mm以下）	5.6、11.2	
C	20	30	0	5.6	
D	20	0	0	11.2	・室温の気乾 ・20℃95％以上の恒温恒湿室内 ・20℃95％以上の恒温恒湿箱内 ・20℃でのパラフィンコーティング
		0	10		
		10	0		
		5	5		
		10	10		

注） 記号Dの水砕スラグは粒径75μm以下のものである。

表-3.1.4 水砕スラグの物理的性質

含水量 (%)	比重	単位容積重量 ( $t/m^3$ )	ふるいの通過率 (mm、%)					粗粒率
			2.36	1.18	0.60	0.30	0.15	
13.5	2.64	0.99	96.3	53.1	16.8	9.2	4.4	3.20

表-3.1.5 水砕スラグの化学成分 (%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	MnO	FeO	S	CaO/SiO <sub>2</sub>
31.4 ~33.2	12.5 ~14.0	38.2 ~40.7	7.0 ~7.5	2.3 ~3.1	0.5 ~1.0	0.3 ~0.8	1.1 ~1.4	1.15 ~1.24

表-3.1.6 安定材の配合および突固めエネルギーと乾燥密度の関係  
( $g/cm^3$ )

石灰添加量 (%)	水 砕 ス ラ グ		突 固 め エ ネ ル ギ ー		
	添 加 量 (%)	細 粒 分 ( % )	( $cm \cdot kgf/cm^3$ )		
			5. 6	5. 6	1 1. 2
0	5		—	1. 9 3	1. 9 5
	1 0		—	1. 9 2	1. 9 5
5	5		1. 8 6	1. 9 0	1. 9 2
	1 0		1. 8 5	1. 8 6	1. 9 2
1 0	5		1. 7 9	1. 8 8	1. 8 8
	1 0		1. 7 7	1. 8 5	1. 8 8

表-3.1.7 安定処理土の配合と適合回帰式 (記号 A)

養生方法	配 合 (%)		適合回帰式番号 (相関係数0.9以上)	相 関 係 数 (0.9以上)					最適回帰式 (5) 式		終局強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
	石	灰 水砕スラグ		式 (1)	式 (2)	式 (3)	式 (4)	式 (5)	回帰係数 A	回帰係数 B	
気乾養生	5	2 5 10	5	— — —	— — —	— — —	— — —	0.994 0.995 0.991	0.462 0.385 0.283	0.451 0.314 0.366	2.217 3.188 2.732
	10	2 5 10	5	— — —	— — —	— — —	— — —	0.999 0.967 0.997	0.332 0.160 0.447	0.199 0.219 0.293	5.031 4.568 3.414
	20	2 5 10	5	— — —	— — —	— — —	— — —	0.998 0.990 0.993	0.176 0.088 0.224	0.147 0.159 0.173	6.798 6.306 5.789
湿潤養生	5	2 5 10	1, 4, 3, 5, 2 5, 4, 2 4, 5	0.993 — —	0.906 0.917 —	0.945 — —	0.978 0.930 0.944	0.935 0.989 0.919	6.265 1.963 3.534	0.340 0.481 0.426	2.938 2.078 2.350
	10	2 5 10	1, 3, 4, (5) 4, 5, 1, 2, 3 4, 5, 1, 2, 3	0.994 0.963 0.960	— 0.939 0.938	0.978 0.904 0.903	0.939 0.983 0.979	(0.889) 0.973 0.973	3.374 2.145 2.814	0.164 0.196 0.219	5.090 5.090 4.566
	20	2 5 10	1, 4, 3, 5 1, 4, 3, 5 4, 1, 5, 2, 3	0.988 0.995 0.980	— — 0.947	0.940 0.954 0.910	0.974 0.974 0.995	0.925 0.936 0.973	1.558 1.720 1.894	0.097 0.107 0.144	10.351 9.365 6.934

注1) 回帰式番号 注2) 相関係数の平均値 (湿潤養生)

- (1)  $Y = A + B X$   
(2)  $Y = A + B \cdot \log X$   
(3)  $Y = A \cdot 10^{BX}$   
(4)  $Y = A X^B$   
(5)  $Y = \frac{X}{A + B X}$

- (1) 式 0.982  
(2) 式 0.929  
(3) 式 0.933  
(4) 式 0.966  
(5) 式 0.953



表-3.1.8 安定処理土の配合と適合回帰式（記号D）

養生方法	配 合（％）		適合回帰式番号 (相関係数0.9以上)	最適回帰式（5）式		終局強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
	石 灰	水砕スラグ		回帰係数 A	回帰係数 B	
気 乾	0	0	5, 4, 2	1.616	0.263	3.799
	0	10	5, 4, 3	0.652	0.345	2.900
	10	0	5	1.183	0.079	12.592
	5	5	5, 2, 4	0.325	0.106	9.436
	10	10	5, 2, 4	0.225	0.047	21.085
湿 潤 室	0	0	5	2.557	0.376	2.662
	0	10	5, 4, 2	5.395	0.620	1.612
	10	0	5	0.590	0.086	11.593
	5	5	5 (0.87)	2.949	0.154	6.514
	10	10	5	0.823	0.068	14.717
パラフィン	0	0	5	4.009	4.293	0.233
	0	10	1, 4, 5 (0.89)	3.714	0.437	2.290
	10	0	5 (0.85)	6.612	0.161	6.200
	5	5	4, 1, 5 (0.71)	2.729	0.030	33.529
	10	10	4, 5	0.976	0.032	31.386
湿 潤 箱	0	0	5, 2	4.512	0.613	1.632
	0	10	4, 5	1.197	0.446	2.241
	10	0	5	2.032	0.075	13.246
	5	5	4, 5, 1, 2	0.822	0.025	40.361
	10	10	4, 1, 5 (0.86)	0.605	0.011	87.689

注）回帰式番号

(1)  $Y = A + B X$

(2)  $Y = A + B \cdot \log X$

(3)  $Y = A \cdot 10^{BX}$

(4)  $Y = A X^B$

(5)  $Y = \frac{X}{A + B X}$

表-3.1.9 安定処理土の熱分析結果（記号A-3）

（試料：83.4 mg）

試 料	減 量（mg）		計 算 値（mg）（mg/1000℃）			ピーク面積（cm <sup>2</sup> ）	
	A（H <sub>2</sub> O）	B（CO <sub>2</sub> ）	Ca(OH) <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	勾配 I	S <sub>1</sub> （Ca(OH) <sub>2</sub> ）	S <sub>2</sub> （CaCO <sub>3</sub> ）
(a) 試料混合直後	2.24	1.10	9.21 (100.0)	2.50 (20.2)	0	18.5 (100.0)	1.8 (10.8)
(b) 気乾養生2年後	0.20	4.48	0.82 (8.9)	10.18 (87.0)	0.97	1.3 (7.1)	13.2 (79.0)
(c) 湿潤養生2年後	0	5.45	0 (0)	12.39 (100.0)	1.68	0 (0)	16.7 (100.0)

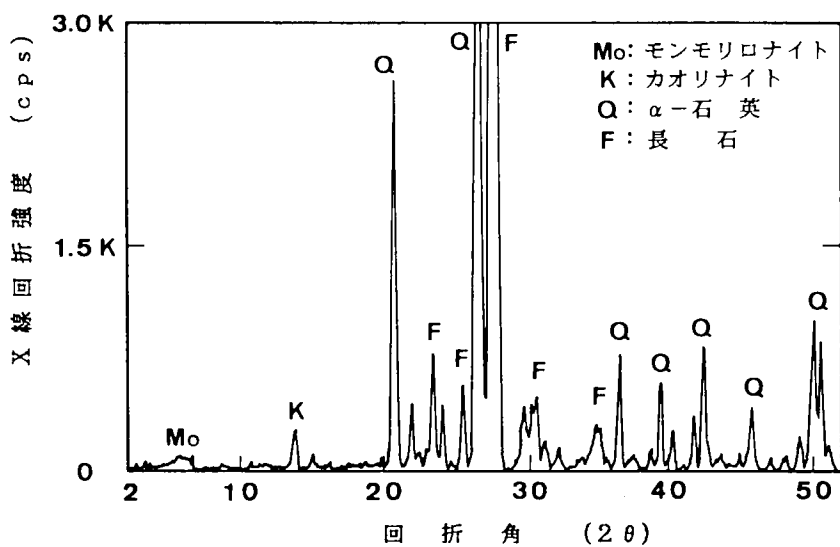


図-3.1.1 まさ土のX線回折結果

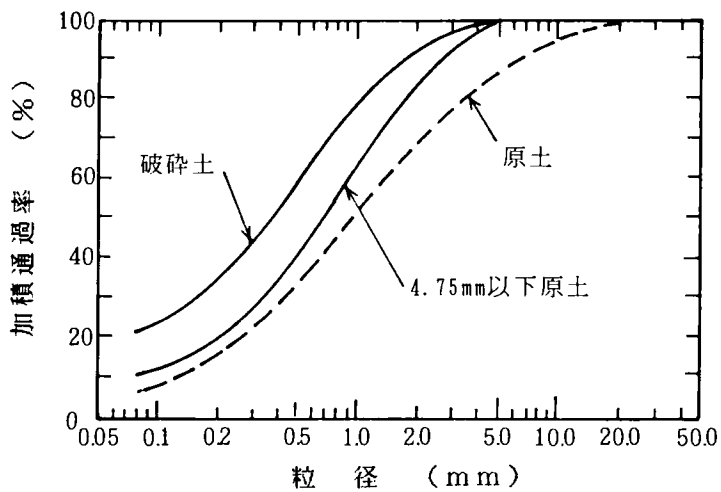


図-3.1.2 まさ土の粒径加積曲線

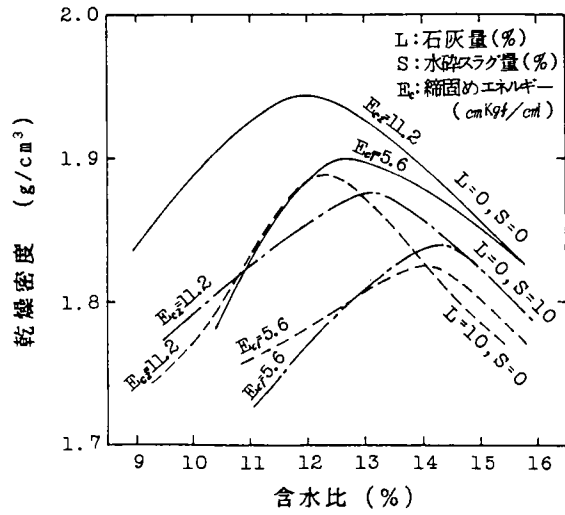


図-3.1.3 安定処理土の突固め曲線 (記号 B)

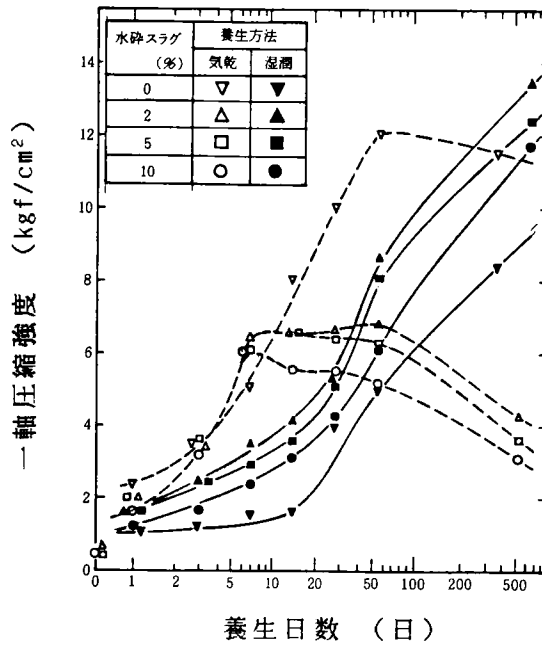


図-3.1.4 養生日数と強度の関係

(記号 A-3、石灰添加率20%、水砕スラグ2.5mm以下)

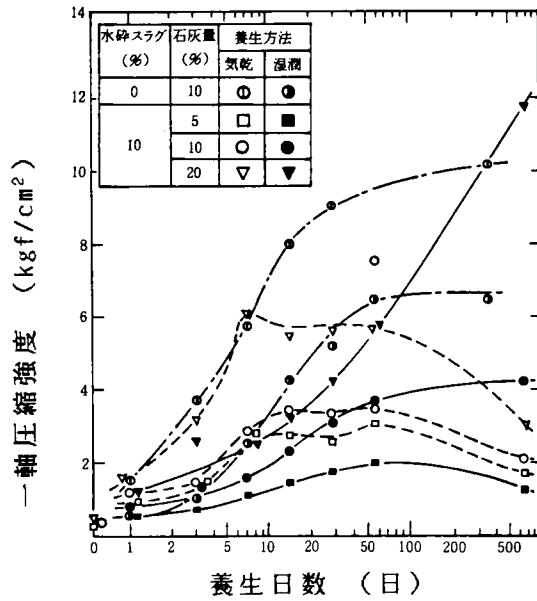


図-3.1.5 養生日数と強度の関係  
(記号A、水砕スラグ2.5mm以下)

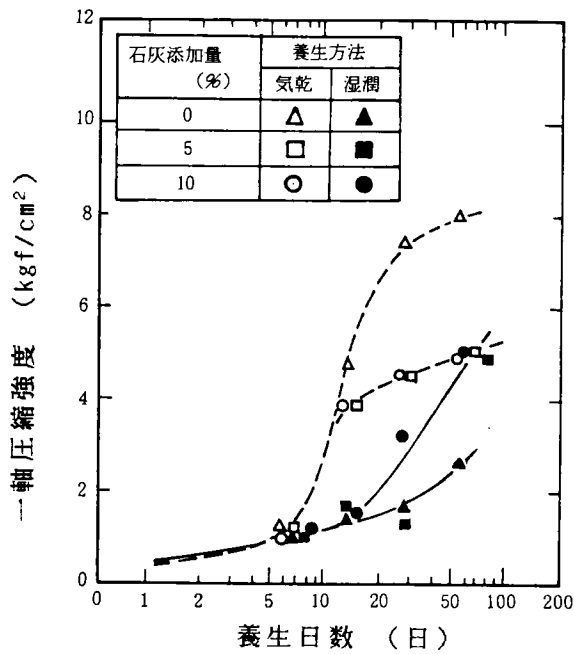


図-3.1.6 養生日数と強度の関係  
(記号B、水砕スラグ0.85mm以下、添加率10%)

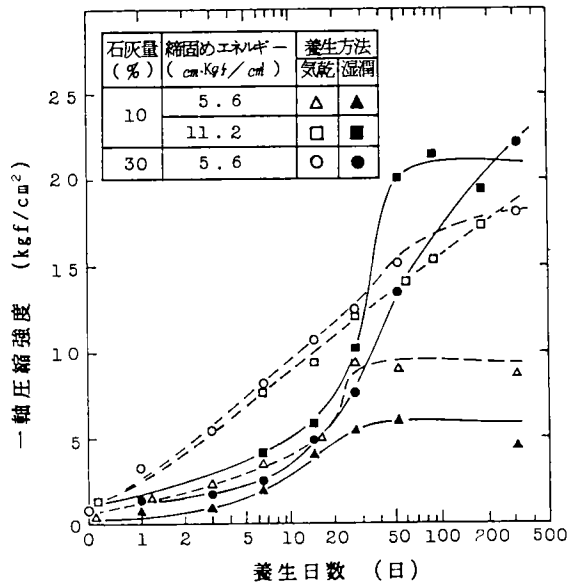


図-3.1.7 養生日数と強度の関係(記号B-3、C)

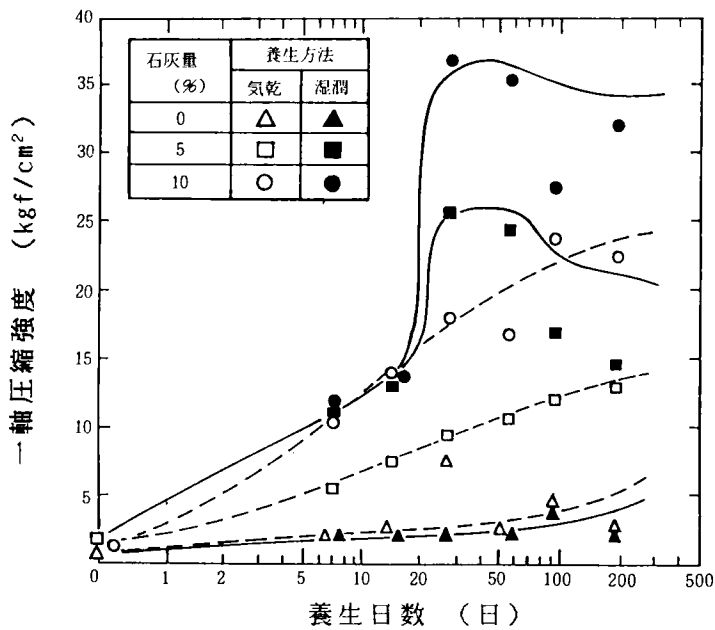


図-3.1.8 養生日数と強度の関係

(記号B、水砕スラグ0.85mm以下、添加率10%、 $E_{c2} = 11.2 \text{ cm} \cdot \text{kgf} / \text{cm}^3$ )

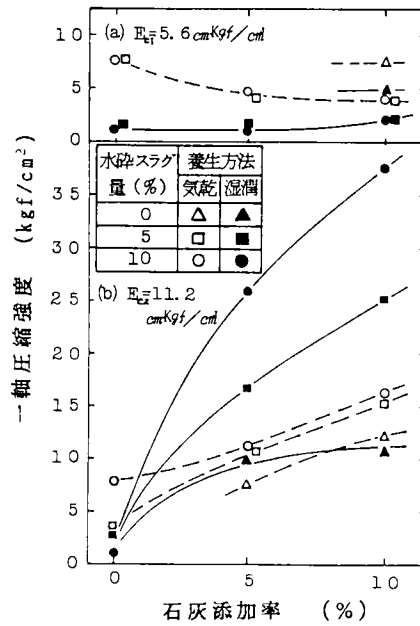


図-3.1.9 石灰添加量による強度変化  
(記号B、28日養生、水砕スラグ0.85mm以下)

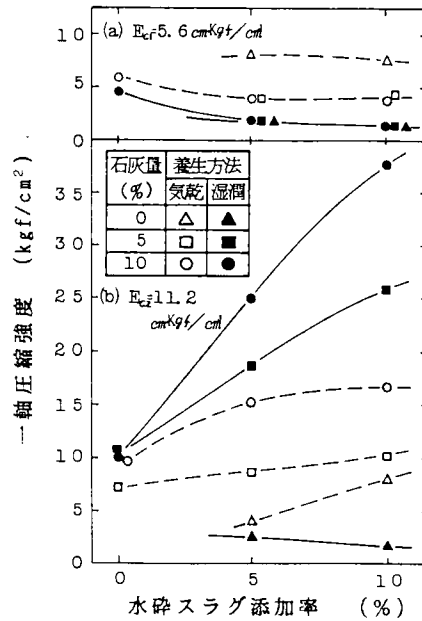


図-3.1.10 水砕スラグ添加量による強度変化  
(記号B、28日養生、水砕スラグ0.85mm以下)

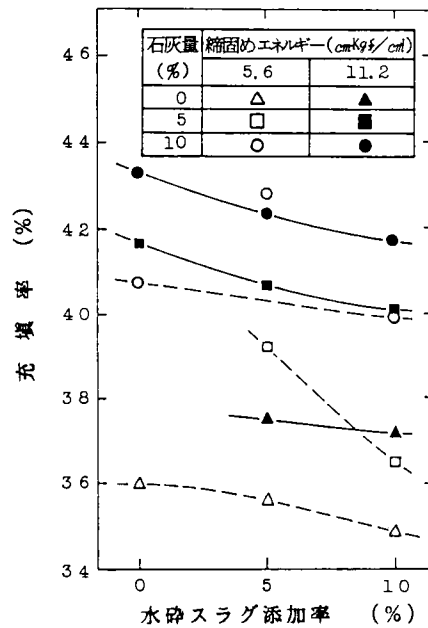


図-3.1.11 水砕スラグ添加量による充填率の変化  
(記号B、水砕スラグ0.85mm以下)

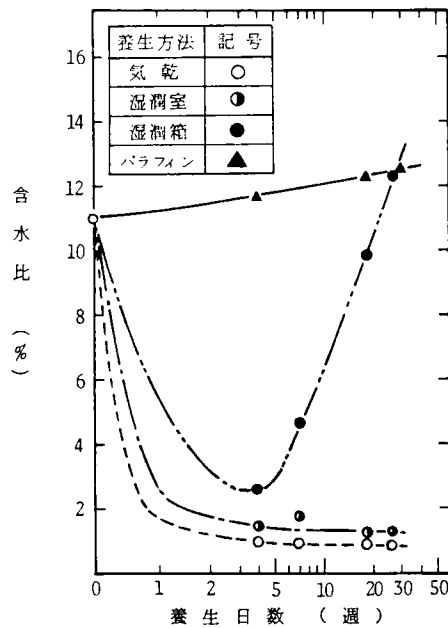


図-3.1.12 養生日数に対する含水比の変化  
(記号D、石灰添加率10%、水砕スラグ75μm以下、添加率10%)

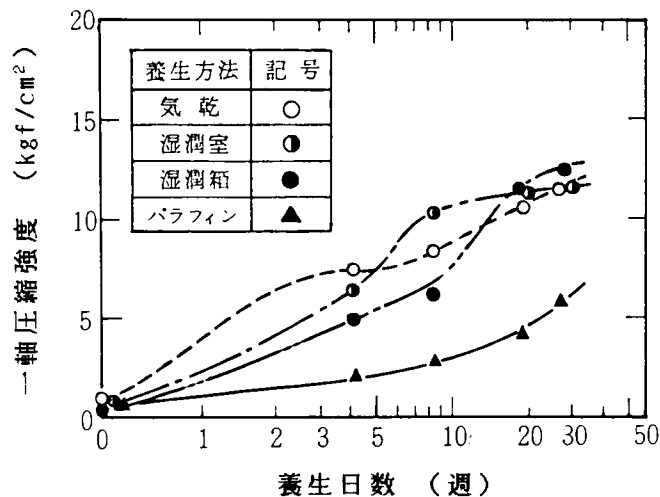


図-3.1.13 養生日数と強度の関係

(記号D、石灰添加率10%、水砕スラグ無添加)

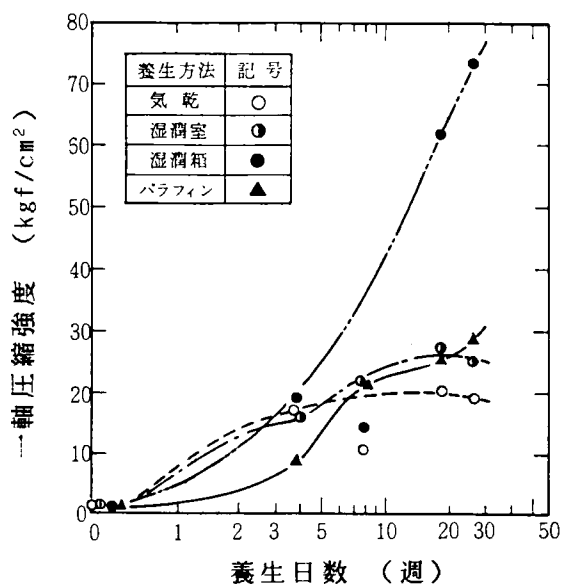


図-3.1.14 養生日数と強度の関係

(記号D、石灰添加率10%、水砕スラグ75 $\mu$ m以下、添加率10%)



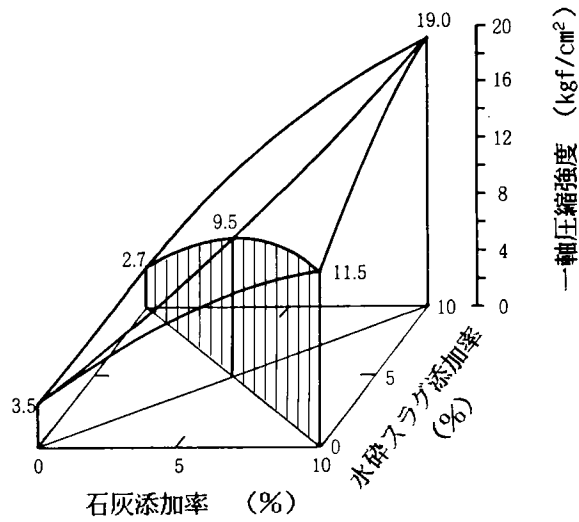


図-3.1.15 安定材の配合と強度の関係（記号D、気乾26週間養生）

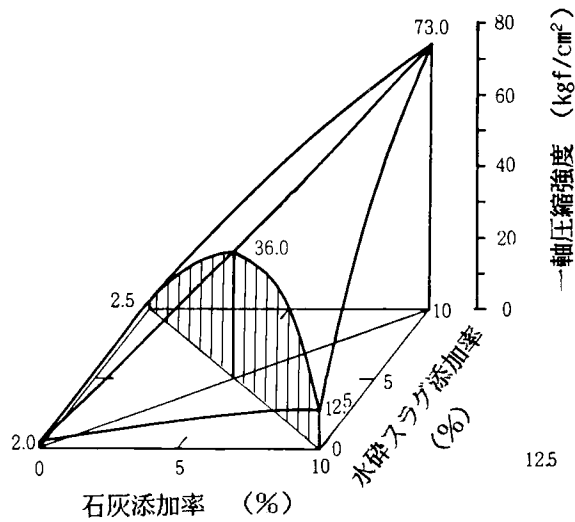


図-3.1.16 安定材の配合と強度の関係（記号D、湿潤箱26週間養生）

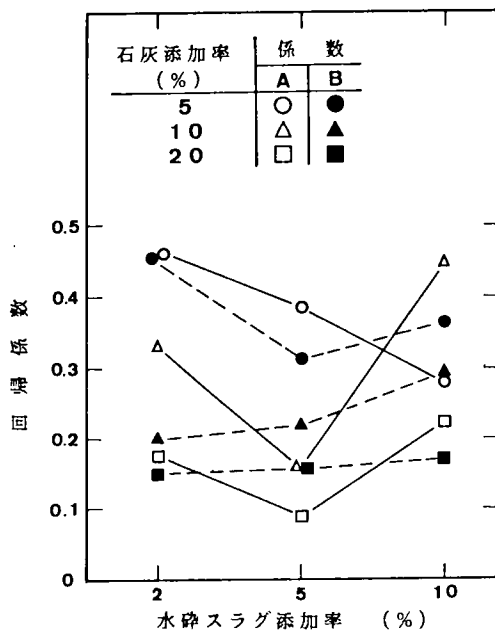


図-3.1.17 水砕スラグ添加率と回帰係数の関係  
(記号A、気乾養生、回帰式(5))

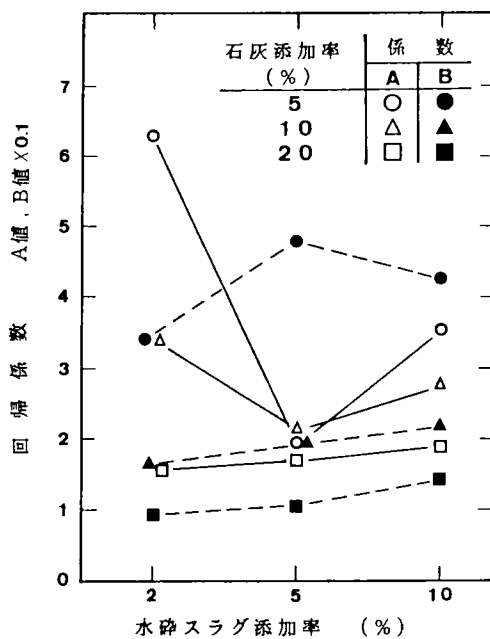


図-3.1.18 水砕スラグ添加率と回帰係数の関係  
(記号A、湿潤養生、回帰式(5))

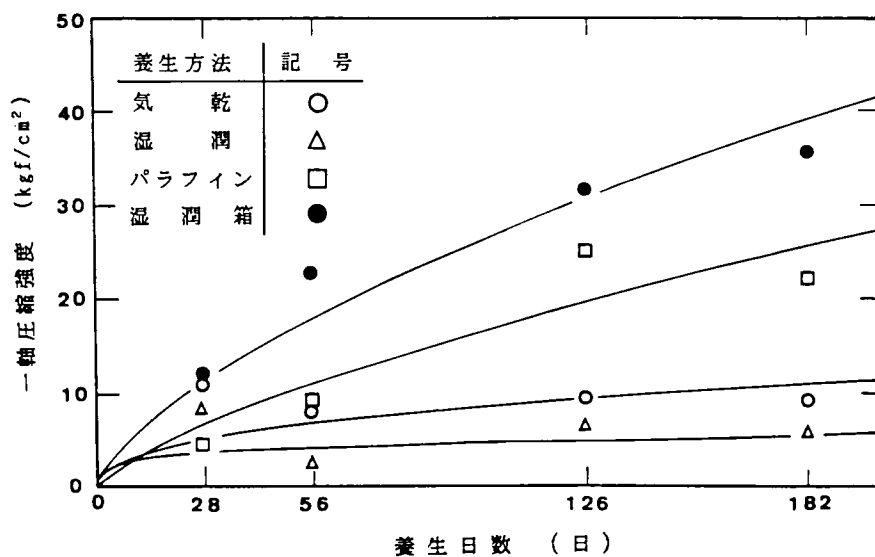


図-3.1.19 養生日数と強度の関係(記号D、回帰式(4))

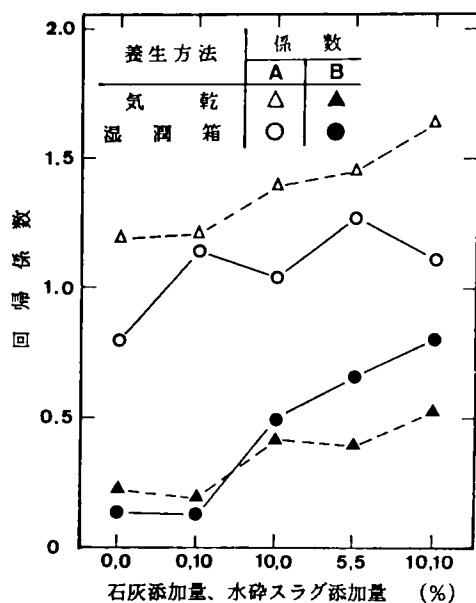


図-3.1.20 安定材の配合と回帰係数の関係  
(記号D、回帰式(4))

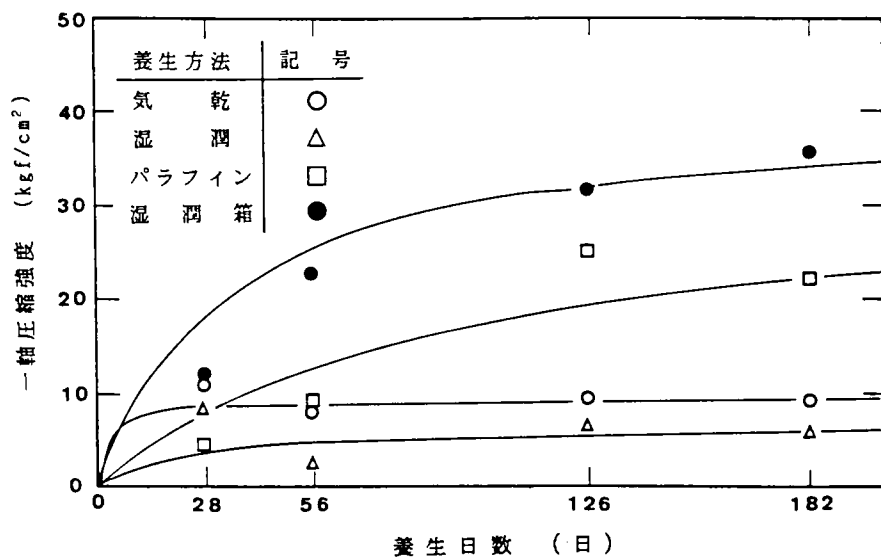


図-3.1.21 養生日数と強度の関係 (記号D、回帰式(5))

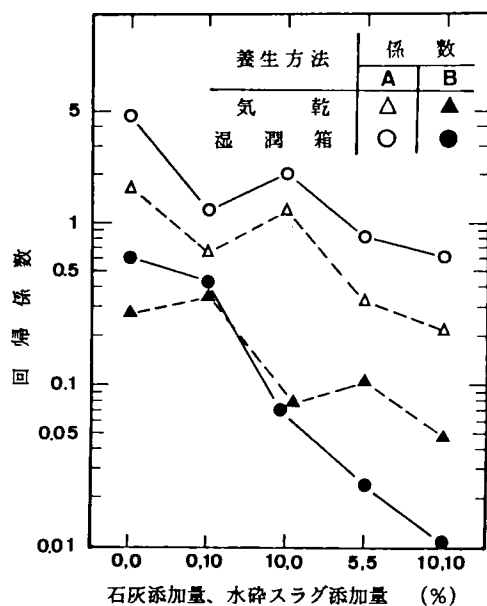


図-3.1.22 安定材の配合と回帰係数の関係  
(記号D、回帰式(5))

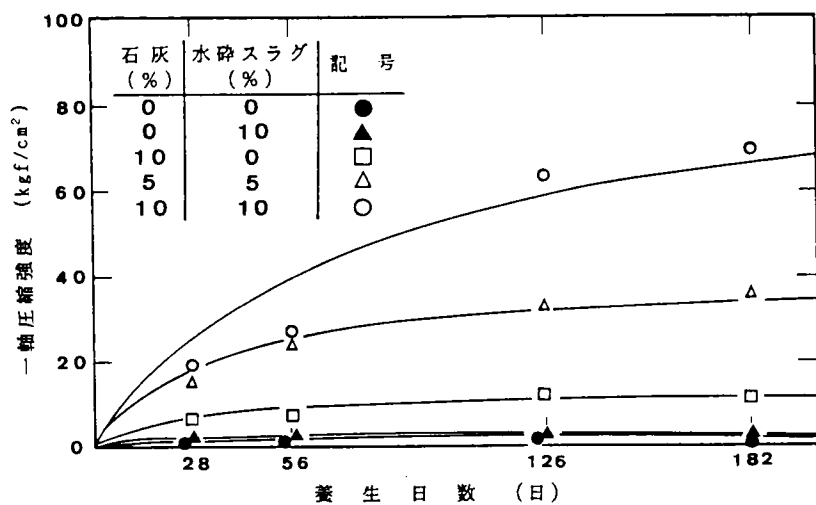


図-3.1.23 養生日数と強度の関係 (記号D、湿潤箱養生、回帰式(5))

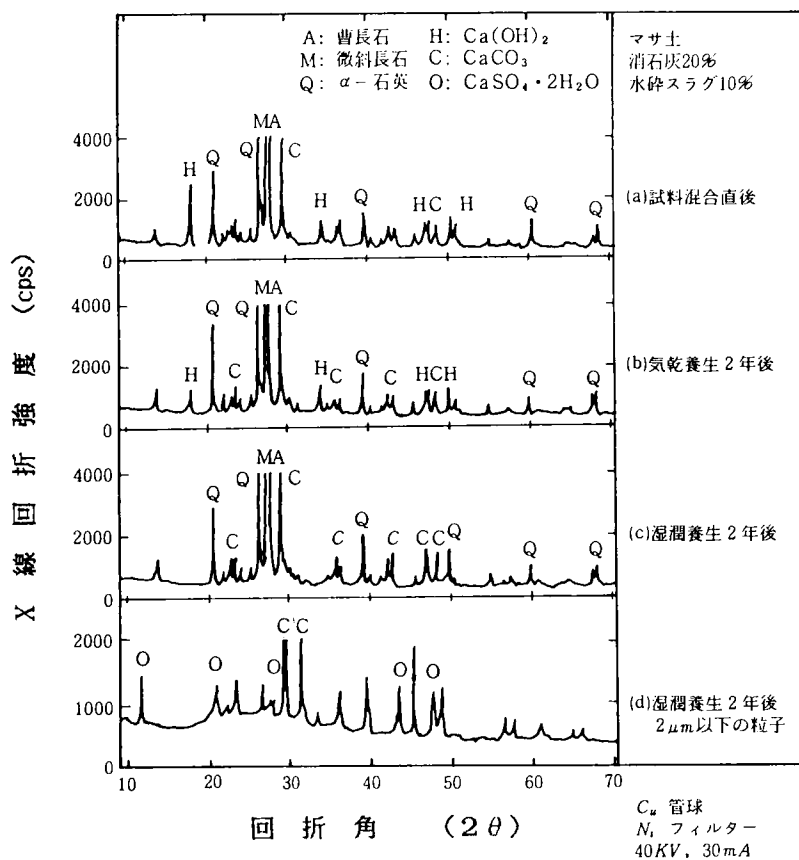


図-3.1.24 X線回折図 (記号A-3、石灰添加率10%、水砕スラグ添加率10%)

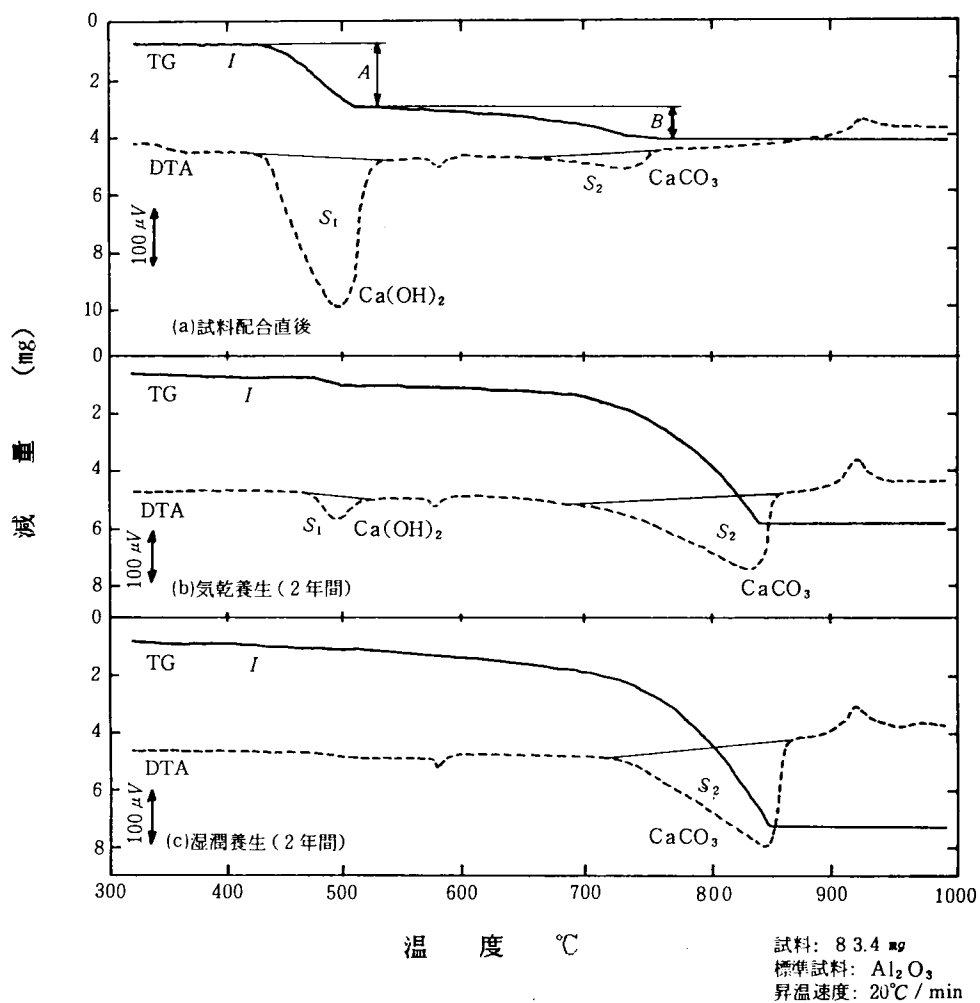


図-3.1.25 示差熱分析曲線

(記号A-3、石灰添加率20%、水砕スラグ添加率10%)

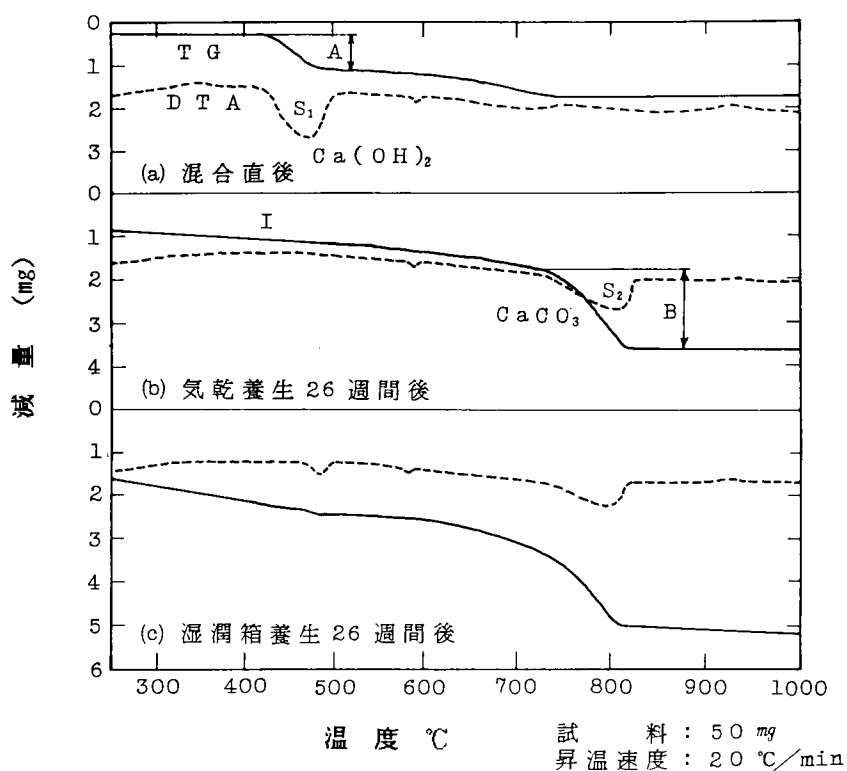


図-3.1.26 示差熱分析曲線（記号D、水砕スラグ添加率10%）

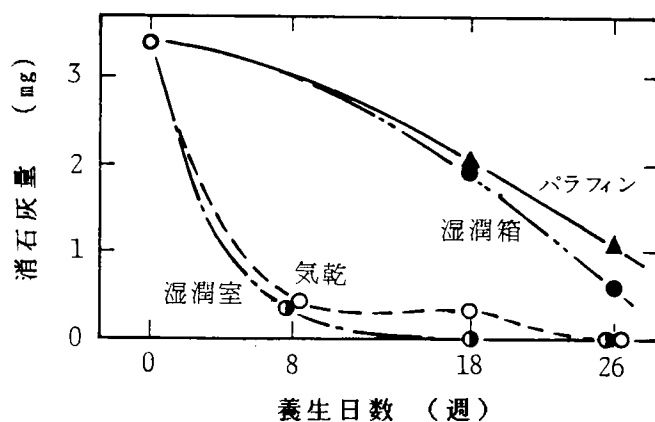


図-3.1.27 養生日数と消石灰量の関係（記号D、試料50mg）

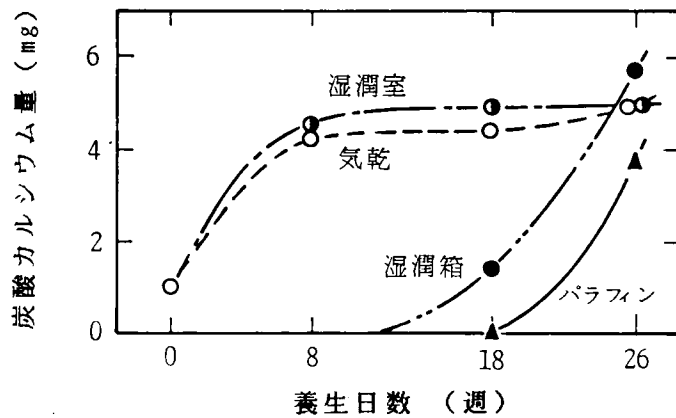


図-3.1.28 養生日数と炭酸カルシウム量の関係  
(記号D、試料50mg)

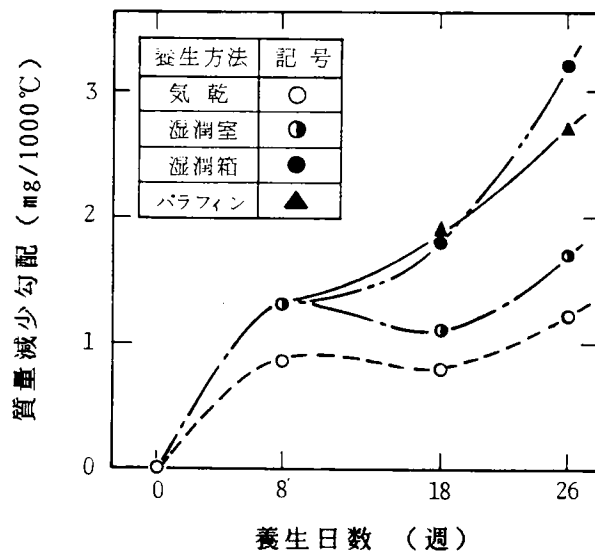


図-3.1.29 養生日数と質量減少勾配 (375~650°C) の関係  
(記号D、試料50mg)



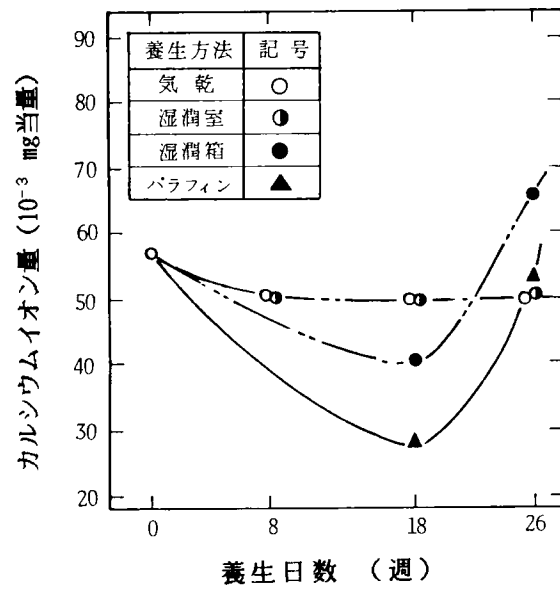


図-3.1.30 養生日数とカルシウムイオン量の関係  
(記号D、試料50mg)

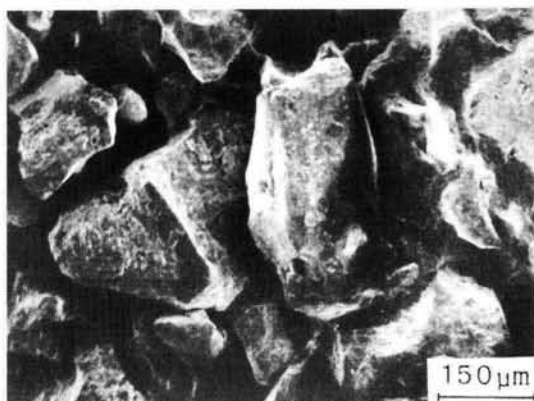
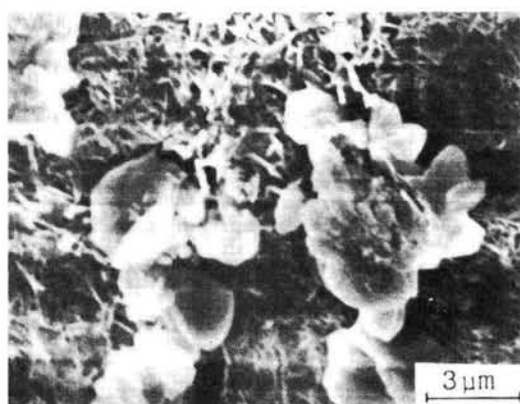
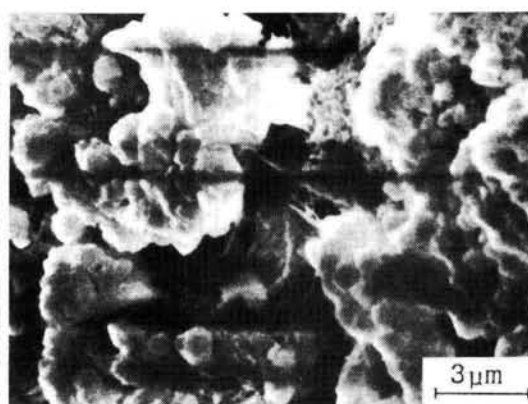


写真-3.1.1 破碎水砕スラグ  
(粒径 $850\mu\text{m}$ 以下)

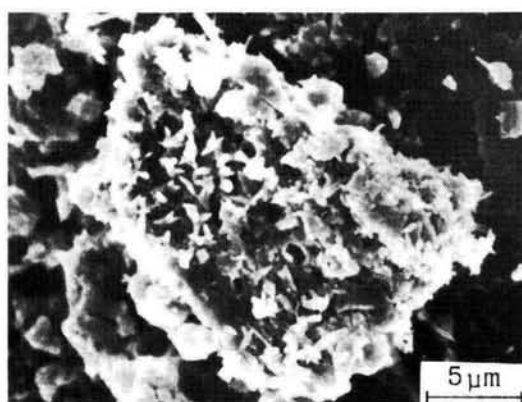


(a)

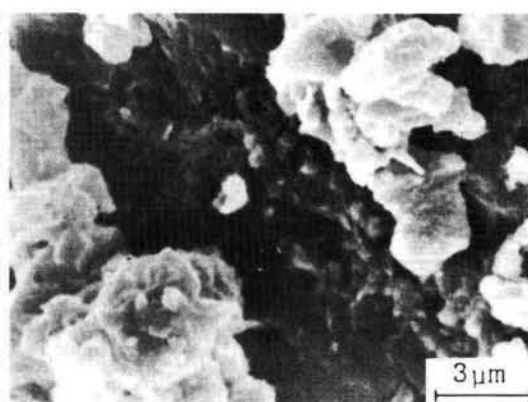


(b)

写真-3.1.2 記号A-3、石灰10%、水砕スラグ(2.5mm以下)  
10%添加のSEM像(湿潤養生、2年後)

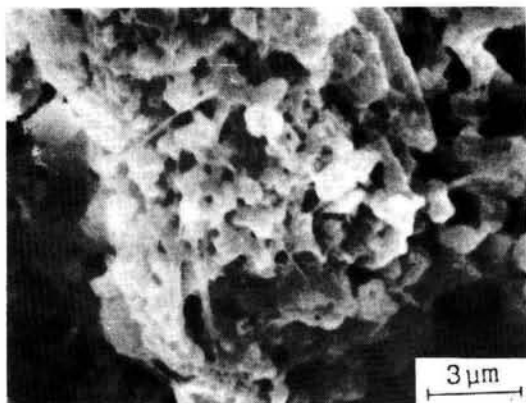


(a)

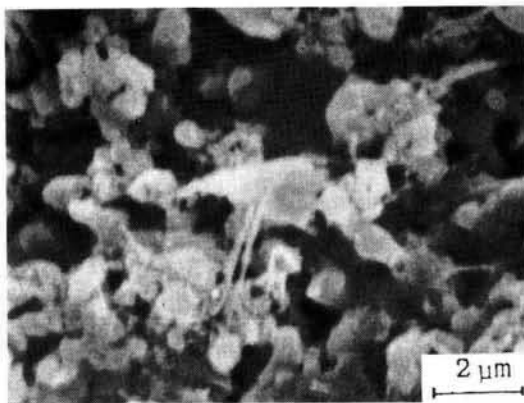


(b)

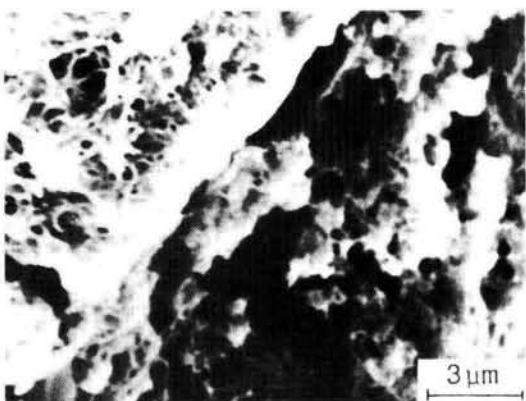
写真-3.1.3 記号A-3、石灰10%、水砕スラグ(2.5mm以下)  
10%添加のSEM像(気乾養生、2年後)



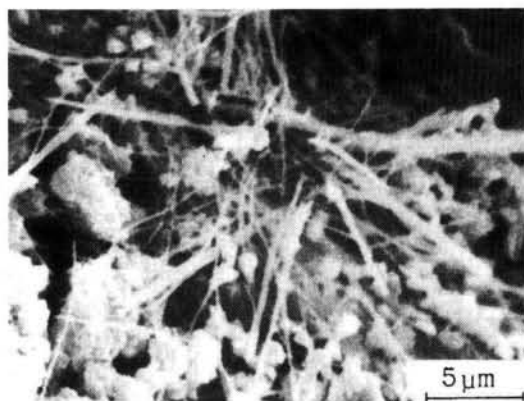
(a) 気乾養生



(b) 湿潤室養生



(c) パラフィン養生



(d) 湿潤箱養生

写真-3.1.4 記号D、石灰10%、水砕スラグ(75 $\mu$ m以下)  
10%添加のSEM像(26週養生)

### 3. 2 超軟弱粘土および沖積粘土の安定処理における強度特性と耐久性に関する研究

#### 3. 2. 1 概 説

わが国は高温多雨の温帯性気候に位置し、国土は狭隘で山岳が多く急峻で、表土の剥奪量は世界の平均に比べ約10倍のオーダとなっている<sup>1)</sup>。その結果、流出土砂量は莫大な量となり、低地では運搬された微細粒子を厚く堆積しており、複雑で利用が困難な軟弱地盤を形成している。また、沿岸部の狭い平地では経済や産業が活発になるに伴い人口が集中し、生活排水や工場廃水による水質汚濁などの問題も発生し、富栄養化などとの相互作用で超軟弱粘土のような高含水比、高有機質、高塑性、および場合によっては有害金属を含有する泥状物質を堆積している。これらの軟弱地盤はこれまで利用が困難なため工事の対象としては避けられてきたのであるが、土地需要の高まりとともに有効利用を図る必要が生じてきた。その結果、建設事業も飛躍的に増加し、それに伴い軟弱粘性土や大量の残土が発生している。これらは主として海面埋立て、又は宅地造成などに処分されてきたが、最近では、埋立て計画の減少や、環境汚染の防止などから、特に大都市周辺においては適当な地域に処分地を得ることが年々困難となってきた。このような状況を考慮すると、これらの超軟弱泥土などを固化することにより付加価値を高め、建設材料として有効に利用することは、処分地の確保の問題と合わせ、省資源の観点からも大変有意義なことである。

一般に、軟弱粘性土の安定処理において、強度に大きく影響する因子は種々なものがあり、処理対象土の粒度、含水比やコンシステンシーなどの物理的性質をはじめ、粘土鉱物や有機物含有量が安定材の水和反応やボゾラン反応に大きく影響することが知られている。特に、松尾ら<sup>2)</sup>は軟弱粘性土中の有機成分がコンシステンシーに及ぼす影響を明らかにし、腐植酸の陽イオン交換容量が大きいことを示している。また、石灰定着点は粘土質量の3～6%の $\text{Ca(OH)}_2$ とされており<sup>3)</sup>、安定材の選択や配合および添加率を考慮する際の大きな要因になる。さらに、処理土中の有機物について、大場<sup>4)</sup>は有機物中のフミン酸が安定処理土の強度低下をもたらすものとし、また、喜田ら<sup>5)</sup>は有機物含有量の多い処理土に対する安定材の成分として、 $\text{SO}_3$ を多量(11～13%)含有するときに大きな強度を発現するとしている。ところで軟弱粘性土には生成環境の相違により種々の有害金属を含有していることが少なくない。これらの土の安定処理においては強度の増加とともに有害物質を溶出させないことが最も重要になる。吉田、喜田ら<sup>6), 7)</sup>はへどろ中の重金属が難溶性の水酸化物になり固定されるとして、セメント・石灰安定処理の有効性を明らかにしている。一方、安定材を用いない観点として嘉門<sup>8)</sup>は微生物や多価カチオンを用いた土質安定および物性の改良についての研究を行っており、安定処理工法の

新しい試みとして注目されている。その他、安定材と強度の関係については多くの知見が報告されている<sup>9)</sup>。

軟弱粘性土の中でも特に微細粒子が水底に浮遊し堆積したものをへどろと定義しており、自然含水比が数百パーセントと液性限界よりも高いため、特に超軟弱粘性土と呼ばれている<sup>10)</sup>。このへどろを、主に環境整備事業の一貫として行われる汚泥浚渫事業により浚渫したものを浚渫汚泥という<sup>11)</sup>。対象を建設省所管事業に限ってみても、昭和59年度でその発生量の大部分に当たる92万 $\text{m}^3$ が、また昭和60年度で97万 $\text{m}^3$ が臨海埋立地での処分に頼っている。将来においても、環境整備事業への期待が一層強まることが予想され、かなりの量の浚渫汚泥の発生が見込まれるが、臨海埋立地の減少による処分地不足が問題となる。

本節は、水質浄化および流路、航路の確保のための底泥除去によって発生するへどろや沖積粘土のような高含水比、高有機質、高塑性および場合によっては有害金属を含有する超軟弱泥状物質などを固化させることによって、その取扱い特性やトラフィカビリティを改善し、埋戻し材、盛土材や道路用材などの建設材料としての利用の可能性を検討することを目的としている。また、処理土中の有機物（特にフミン酸）の存在による固化効果への影響も考えている。

一方、安定処理土を実際の現場に適用する場合を考え、乾燥と湿潤のくり返しによる細粒化と崩壊性の二つの面より耐久性も併せて検討している<sup>12), 13), 14), 15)</sup>。

### 3. 2. 2 材料特性と実験概要

#### (1) 石灰・セメント系安定材を添加したへどろの強度試験

実験に用いた試料は兵庫県明石市の機械工場の排水路（へどろAと呼ぶ）、および農耕用ため池に堆積するへどろ（へどろBと呼ぶ）と、茨城県霞ヶ浦土浦産のもの（へどろCと呼ぶ）の三種類であり、いずれも淡水性のへどろである。へどろAは堆積期間が約1年のものであり、黒色で硫化水素臭の強いものである。へどろBは4～5年の堆積物であり、灰色で臭いは少ない。また、へどろCはA、Bに比べて細粒分、特に硬化活性の高い粘土鉱物を多く含有している。これらの化学成分および物理的性質を表-3.2.1, 2に、また、粒度分析結果は図-3.2.1に示すとおりである。へどろAには約40%の粗粒分があるが、いずれのへどろも日本統一分類ではシルト（HM）に分類される。

へどろCのSEM写真を写真-3.2.1, 2に示す。へどろは不定形の微細な粒子であり、球状や網目状の珪藻がかなり多く見られる他、繊維状のものなど種々の混入物が見られる。

X線回折の結果によると、一次鉱物としては石英、各種の長石類や雲母が見られ、粘土鉱物

としてはモンモリロナイト、イライト、カオリナイトが確認された。これらの粘土鉱物の回折ピークから考えると、活性の高いモンモリロナイトはへどろAは少なく、B、Cになるに従って多くなっていることがわかる。特に、へどろCではモンモリロナイト以外の他の粘土鉱物含有量も多くなっている。また、含有量は少ないが、ハロイサイトやパーミキュライトもみられた(図-3.2.2)。

供試体の成形はへどろの含水比を液性限界の約1割増しの83%と218%に調整し、安定材の添加率はへどろの湿潤質量に対して3、6、9、12%の4とおりとした。安定材は主材として普通ポルトランドセメント(以後、セメントと呼ぶ)と消石灰(以後、石灰と呼ぶ)、固化助材として炭酸アルミネート系塩材料(石灰20%、硫酸アルミニウム50%と炭酸ナトリウム30%を混合したものであり、以後、C A S材と呼ぶ)と石膏である。また、比較のため、軟弱粘性土用に市販されているセメント系特殊安定材も使用した。これらの安定材の配合を表-3.2.3に示す。供試体の締固めは土質工学会基準、「安定処理土の締固めをしない供試体作製方法」(J S F E 821)<sup>16)</sup>に準じて行い、20℃、90%の恒温恒湿室で所定期間養生後、一軸圧縮試験を行った。一軸圧縮試験後の供試体は物理的性質、化学的性質、微視的内部構造の変化や、反応生成物の観察を行うために、コンシステンシー試験、p H試験およびX線回折、S E Mによる観察、S E M-E D X A分析などを行った。

一方、処理土中の有機物(特に、フミン酸)の固化効果への影響を調べるために、フミン酸を除去したへどろにより供試体を作成し、土中のフミン酸含有量の変化と固化効果との関係を検討した。

なお、フミン酸の抽出方法は次のとおりである。

- (7) 湿潤状態の試料を0.5 NのNaOH溶液中に浸して48時間放置した後、遠心分離機を用いて、ろ液と沈澱物を分離する。この段階で、土中の有機物のうちのアルカリ可溶性成分であるフミン酸とフルボ酸がろ液として抽出される。
- (8) ろ液に、0.5 NのHCl溶液を加えてp H 7にすると、フミン酸のみが沈澱するので、フミン酸とフルボ酸が分離できる。
- (9) この沈澱物を取り出して、再び0.5 NのNaOH溶液中に浸して(8)と同様の作業をもう一度繰り返す、純度の高いフミン酸を抽出する。
- (10) 次に、0.5 NのHCl溶液により、p Hを5および3に調節し、それぞれの時に沈澱物としてフミン酸を抽出する。その際、フミン酸には生成した塩化物が含まれているので、これを取り除くために遠心分離機により水洗いを行った。この操作は、塩素イオン濃度を測定しながら、塩化物が除去されていることを確認できるまで、数回繰り返した。
- (11) このようにして抽出したフミン酸は、炉乾燥して定量した。

(カ) (7)の操作によって残った沈澱物に0.5NのHCl溶液を加えて中和し、生成した塩化合物を取り除くために、(イ)と同様にして遠心分離機により水洗いを行った。

以上の操作によりフミン酸を除去した試料を準備した。

## (2) 生石灰および水砕スラグを添加した沖積粘土の強度と耐久性試験

強度試験に用いた試料は神戸六甲アイランドの沖積粘土（以後、試料Dと呼ぶ）であり、耐久性試験に用いたものは大阪南港のもの（以後、試料Eと呼ぶ）である。表-3.2.4および図-3.2.2はそれらの物理的性質とX線回折結果である。図には試料Dを示しているが、どちらも比較的粗い粒子から細粒に至るまでの広い範囲にわたる粒度分布であり、硬化活性の高い粘土鉱物も多いことがわかっている。

安定材は主材として生石灰を使用し、固化助材として軟式の水砕スラグを用いた。そして、水砕スラグは強度試験には粒径が0.85mm以下のものと75 $\mu$ m以下、およびブレン値が約4000 cm<sup>2</sup>/gの細粒子の3種類を使用し、また耐久性試験には0.85mm以下および75 $\mu$ m以下の粒径のスラグを用いている。安定材の配合は沖積粘土の湿潤質量に対し、生石灰を0、5、10%の3種類に対し、水砕スラグを0、2、5、10%の添加率で組み合わせた12とおりである。

供試体の作成は沖積粘土の含水比を液性限界より高い試料Dで125%、試料Eで90%に調節した後、強度試験は直径5cm、高さ10cmの型枠に、また耐久性試験では直径5cm、高さ2.5cmの型枠に空気が残らないように振動を与えながらヘラで詰めた。養生は20℃、湿度90%以上の恒温恒湿室で行い、耐久性試験では実験室内に放置しておく気乾養生も行っている。

強度試験は7、14、28日養生後、一軸圧縮試験を行っている。一方、耐久性試験は7、14、28、56日間養生した後、シャーレ中の有孔アクリル板に載せ（写真-3.2.3）、50℃の炉乾燥2日間、水浸1日間を1サイクルとして5サイクルまで乾湿を繰り返す耐久性試験を行った。その際、1、3、5サイクル終了後、有孔アクリル板上にとどまっている処理土の質量を測定するとともに、3、5サイクル終了後に崩壊した土をも含めてふるい分け試験を行い、粗粒率を求めた。なお、ふるい分け試験は作業中の粒子破碎をできるだけ避けるため、2.00、0.85、0.425、0.250、0.106、0.075mmの6種類のふるいによる水ふるい法<sup>17)</sup>（団粒分析装置、図-3.2.3）を用いた。

## 3.2.3 石灰・セメント系安定材を添加したへどろの強度特性

図-3.2.4、5はへどろA、Bに処理効果の最も良い安定材を12%添加した供試体の養生日数と一軸圧縮強度の関係を示している。これによると、全ての安定材において養生の経過とともに

に強度の増加がみられるが、28日養生以後の強度増加は少なくなっている。

安定材の種類による強度発現の傾向を見ると、石灰系のHBLでは、へどろA、Bとも安定材を12%添加したものでも、91日養生後の強度が約0.5kgf/cm<sup>2</sup>であり、他のセメント系安定材に比べ最も小さな値となっている。言い替えると、セメント系安定材が石灰系安定材に比べて大きな固化効果を示している。一方、セメント系の安定材を比較すると、セメント単独のHCと、セメントにCAS材を5%混合したHBCによる処理土において、へどろAでHCの強度がHBCのそれを若干上回っているのに比べ、へどろBではHBCの強度はHCの約1.7~1.2倍となり、特に、養生初期における強度増加が著しく、CAS材を混合した効果がみられる。また、CAS材と石灰量を増加し、セメント混合率の少ない配合のHGCと、その5%を石膏で置き換えたHGCSではHC、HBCに比べ強度は低いながらも、へどろAではどちらもよく似た強度を示している。しかし、へどろBではHGCSはHGCの約1.5倍の強度になり、石膏を混合した効果が明らかで、安定材の種類による処理効果の違いを示している。図-3.2.6, 7は28日養生後の安定材添加率と一軸圧縮強度の関係である。どちらのへどろも6%以下の添加率では強度の発現はみられず、特に、3%では供試体の自立も困難な状態であった。しかし、9%以上の添加率では強度の増加がみられ、安定材添加量に対する強度増加率はへどろBの方が大きくなっている。

図-3.2.8はへどろBの供試体の110℃で炉乾燥して求めた含水比の変化を示している。処理効果のあったHBCやHGCSでは他の安定材を使用したものに比べ、3日の養生初期より、約10%小さい含水比を示しており、強度増加に貢献していることがわかる。

次に、へどろの違いによる安定材の固化効果を比較するためへどろAに対するへどろBの強度比を表-3.2.5に示した。石灰系のHBLではすべての添加率で強度比が1.0より小さくなっており、へどろAがBに比べ固化の程度が高いことを示している。一方、セメント系安定材では6%までの少ない添加率の供試体では、値は低いながらもへどろAが若干高い強度を示しているが、9, 12%の高添加率では逆にへどろBの強度の方が高い結果となっており、特に、CAS材および石膏の含有量の多いHGC、HGCSの強度比が高くなっている。図-3.2.9, 10は91日養生後の供試体の変形係数を示している。変形係数は強度試験の結果とよく似た傾向であり、特に、HBLは12%の添加率でも約30kgf/cm<sup>2</sup>程度の小さな値になっている。また、その他の安定材では70~160kgf/cm<sup>2</sup>の値を示し、安定材添加率の増加とともに変形特性が改善されたことを示している。

以上に示した強度特性の原因としては、まず、処理土中のフミン酸の存在があげられる。表-3.2.6は各々のへどろからフミン酸の抽出方法において、pHを7、5および3に調整したときに析出したフミン酸量である。フミン酸の種類による固化の障害程度は明らかではないが、



久楽ら<sup>18)</sup>が安定処理土の強度低下の要因として報告している pH 7 では、へどろ A の含有量は B と C の約 3 ～ 4 倍になっており、pH 3、5 でもへどろ A には多くのフミン酸が存在している。一般に石灰による安定処理工法は処理土中の有機物による固化の阻害作用がセメントに比べ少ないといわれており、フミン酸含有量の多いへどろ A はその影響がセメント系安定材より小さく、H B L で全ての添加率にわたりへどろ A の強度がへどろ B を上回ったものである。一方、H B L 以外のセメント系安定材の添加ではへどろ A は B に比べ表面積の大きな細粒分が少なく、供試体の骨組構造を形成する粗粒分を多く含有するため比較的少ないセメント系安定材の添加でへどろ A の強度が高かったものと考えられる。しかし、9、12% の様に添加量を多くするとセメントの水和反応および水和反応によって析出される石灰のボゾラン反応などの硬化反応が促進され、特に、へどろ B はフミン酸含有量が少ないためセメント系の安定材による固化効果が大きくなったものと考えられる。へどろ B のうち比較的固化効果の高い安定材 H C および H B C 処理土の養生日数と強度の関係を示したものが図-3.2.11 である。また、図-3.2.12 は次の 3 章 2.4 で有機物の影響を検討するへどろ C のものである。これらによると、安定材添加率が 3、6% ではほとんど処理効果はみられないが、9% と 12% の添加では養生の経過に伴い強度は確実に増加しており、特に、へどろ C は B に比べ供試体の含水比が高いにも関わらず、養生初期より高強度を示している。これはへどろ C が軟弱粘性土を固化するとき有効とされている活性の高い粘土鉱物やアルミニウム成分を多く含有しているためと考えられる。

次に、へどろ C に市販の軟弱粘性土用セメント系特殊安定材を 12% 添加した処理土の養生日数と強度の関係が図-3.2.13 である。セメント系特殊安定材を用いた H B K、H K はセメントを用いた H B C、H C に比べ約 2 倍の強度となり、その優れた固化効果を示している。これらの強度増加の原因はエトリンガイトの生成と考えられる。すなわち、C A S 材や石膏およびセメント系特殊安定材により生成される硬化反応物のエトリンガイトが、結晶水として多くの水を取り込むため、供試体の含水比が低下するとともに、針状の結晶が土粒子の移動を拘束し、強度増加に貢献するものである。これらの試料の養生日数の経過に伴う変形係数の変化を、図-3.2.14、15 に示す。変形係数は養生日数の経過に伴う強度の増加と同様、また、添加率の増加に対し顕著な増加傾向を示している。また、セメント系特殊安定材を用いた H B K、H K ではセメントを用いた H B C、H C 以上の剛性を得ている。

図-3.2.16 はへどろ C 処理土の養生日数の経過に伴う pH の変化を示したものである。ここで、pH 試験は土質工学会基準、「土の pH 試験方法（案）」（JSF T7T）に準じて行っている。硬化反応が持続するためには処理土が強アルカリに保たれている必要がある。28 日養生後で比較すると、安定材を 12% 添加した処理土の pH 値は 11 以上であり、今後の強度増加が期待できるが、添加率が 3% のものの pH 値は約 9 ～ 10 まで減少しており、固化の増進は少ないも

のと考えられる。

固化処理土の現場への適用性を検討すると（図－3.2.11, 12）、処理目標強度として、へどろを原位置で固化するためには2章2.2で示したように一軸圧縮強度で $1.0\text{kgf/cm}^2$ が必要であり、安定材添加率が12%のへどろBおよび9%のへどろCにおいて、目標強度を達成するのにHCでは7日程度を必要とするのに比べ、HBCでは3日で達成していることがわかる。また、同じ安定材添加量であればHBCの方が強度発現の速いことがわかる。そして、へどろCの3日養生ではHCを使用すると12%の添加量が必要であるのに比べ、HBCでは9%の添加で良く、CAS材の添加は工事の施工日数の短縮や安定材料の節約に効果がある。次に、ダンブトラックなどによる運搬性能および建設機械のトラフィカビリティ改善では目標強度は $0.5\sim 1.0\text{kgf/cm}^2$ 程度で良く、へどろBでは9%、へどろCでは6%の安定材添加率で満足すると考えられる。一方、道路用材として、有機質土の一軸圧縮強度とCBRとの関係式<sup>19)</sup>  $CBR = 6.7qu - 3.6$ より試算すると、一軸圧縮強度が $1.0\text{kgf/cm}^2$ の場合、CBRは3程度と推定でき、埋め立て用材や道路の路床材としての可能性が考えられる。さらに、セメント系特殊安定材の使用により路盤材としての可能性も考えられる。

### 3.2.4 へどろ中の有機物と各種安定材による固化処理効果の関係

へどろ中の有機物が固化強度に及ぼす影響を調べるために有機物中のフミン酸とフルボ酸を除去した試料で供試体を作成し、同様の強度試験を行った。図－3.2.17は安定材にHBCを使用した処理土、および図－3.2.18は、フミン酸を含有したへどろと除去したへどろに対して、各種の安定材を9%添加した処理土の強度試験結果である。図－3.2.17によると、添加率3%ではフミン酸の有無による強度の違いは見られないものの、添加率9%のものでは、フミン酸を除去することによって飛躍的に強度が伸びており、固化効果に及ぼすフミン酸の影響は大きなものであることがわかる。これらの結果はHC、HK、HBKのいずれの場合でも同じ傾向を示している。次に、安定材の違いによる強度を比較すると、フミン酸を含むへどろではセメント系特殊安定材のHBKとHKが高い強度を示すが、フミン酸を除去すると、セメントだけのHCでも大きな固化効果のあることがわかる。

これらの試料のフミン酸を除去したものとししないものの、へどろ処理土について、3日と28日養生後の無処理へどろに対する塑性指数の減少量と強度との関係を図－3.2.19に示す。塑性指数の低下は安定処理土中の細粒分の減少を意味しており、処理効果の目安となるものである。いずれの処理土でも団粒化などによる細粒分の減少のため塑性指数の低下がみられる。一方、フミン酸を含有しているへどろの強度はフミン酸を除去したものに比べ、一軸圧縮強度は大変

低い値になっている。これは安定材中のCa元素とフミン酸によりフミン酸石鹼をセメント粒子表面に生成した結果<sup>20)</sup>、硬化反応の阻害や遅延のため処理土の剛性が増加しなかったものと考えられる。

### 3. 2. 5 石灰・セメント系安定材を添加したへどろの反応生成物と微視的構造

#### (1) 電子顕微鏡による微視的構造の観察

石灰・セメント系安定材による処理土のSEM観察は安定材添加率3%と12%のものについて行ったが、へどろの種類による違いはほとんど見られなかった。写真-3.2.4は比較的反応性のよいHBCを3%添加したものである。添加率が3%の処理土はいずれの安定材においても反応物の生成はわずかであり、へどろ粒子の輪郭が明瞭で粒子間の空隙も大きなものである。そして、養生が経過しても硬化反応物はほとんど見られないことから強度があまり増加しなかったものといえる。一方、安定材添加率を12%にしたHC、HBCの観察によると、どちらも箔状のCSH系反応生成物や針状・繊維状のエトリンガイトが養生初期から生成し、石灰や炭酸カルシウムの不定形の細粒子が処理土の表面を覆っている（写真-3.2.5～8）。また、セメントに石灰、CAS材、石膏などを混合したHGC、HGC SではHCやHBCとはほぼ同じ形状の反応生成物がみられ、石灰成分により土粒子間の空隙は小さくなっている。そして、処理土表面を覆っているエトリンガイトの生成量は多くなっているが、長さや太さの成長度は劣っており、またCSH系反応物の生成も少なくなっていることから強度が少し小さくなったものと考えられる（写真-3.2.9～12）。

次に、写真-3.2.13～15に見られるように、石灰系安定材のHBLでは土粒子間隙の多くを添加した石灰や炭酸カルシウムで埋めており、土粒子の表面のエトリンガイトは大きく成長し、針山のような形が多くみられる。この針山状のエトリンガイトはへどろBのCAS材添加のものに限り見られるものであり、エトリンガイトの生成に必要な元素とへどろBの反応効果と思われる。

写真-3.2.16～18はへどろCをHC、HBC、およびセメント系特殊安定材HKで処理した試料のSEM写真である。いずれもセメントの水和反応物であるCSH系生成物が土粒子表面に多くみられる。HCとHBCのSEM写真を比較してみると、HC（写真-3.2.16）では箔状のCSH系反応物やCaCO<sub>3</sub>の他に微細な針状結晶が見られる。一方、HBCでは比較的長いエトリンガイトが互いに絡み合った構造が見られ（写真-3.2.17）、相対的にエトリンガイトはHBCの方が多く生成している。また、セメント系特殊安定材を用いた供試体では、エトリ

ンガイトを生成させる成分が多く含まれているため、針状の反応生成物のエトリンガイトが特に多く見られる（写真－3.2.18）。

SEM－EDXA分析の結果によると、HCでは写真－3.2.19に示すようにCSH系反応生成物とCa、Al、Si、Sなどの元素で構成されているモノサルフェート水和物の板状結晶やエトリンガイトの針状結晶および微細な粒状の結晶が認められた。一方、HBCではエトリンガイトの他に板状のCAH系生成物、および箔状のCSH系反応生成物が確認できる（写真－3.2.20）。また、HK、HBKを添加した供試体やNaOH処理したへどろを用いたものでも同様の反応生成物を確認している。

以上の結果、へどろの硬化活性という面ではへどろAに比べB、Cの反応効果が高いことがわかった。そして、安定材ではHBLがエトリンガイトなどの反応物の生成が活発なようであるが、CSH系反応生成物が少なくなっている。一方、セメント系のものではセメントの配合比の多いものはCSH系反応生成物とともにエトリンガイトは大きく成長したものがみられるのに対し、CAS材や石膏を多く含有し、セメント添加量の少ないものはエトリンガイトの生成量は多くなっているが、その成長度は小さいものとなっている。

## （２） X線回折による反応生成物の検討

X線回折では、有機物を含有する軟弱粘性土の固化処理に影響の大きい硬化反応生成物であるエトリンガイトに焦点をあてて追究した。

図－3.2.20は各種安定材中のエトリンガイトのX線回折強度（ $d=9.7\text{\AA}$ ）を添加率ごとにまとめたものである。いずれも添加率の増加に従い、エトリンガイト生成量は増大している。エトリンガイトの生成量は、CAS材を30%混合したHBLが最も多く、HBC、HC、HGCSはよく似た値でそれに続き、HGCのエトリンガイト生成量は最も小さい値である。しかし、HGCはCAS材が9%、石灰が21%配合されエトリンガイトを構成する元素は多く存在しており、また、エトリンガイトは空気の透過の少ない環境にあっては炭酸化が進まず、安定性の高い鉱物であるといわれており、HGCによる処理土中のエトリンガイト生成量が安定材添加量の増加により少なくなることは考えにくい。この安定材添加量の多い配合でエトリンガイト生成量が減少する傾向はHBLやHGCのような石灰分の多い供試体の長期養生においてだけにみられることであり、これらの配合ではCSH系反応生成物や $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CaCO}_3$ が多く生成され、長期間の養生により初期に生成したエトリンガイトの表面を覆うためエトリンガイトのX線回折強度が低下したものと考えられる。また、安定材としてセメント系特殊安定材を用いたものでは、セメントを用いたものに比べて明らかにエトリンガイトの生成量は多くなっており、セメント以上の強度が得られた理由の一つと考えることができる（図－3.2.21）。

図-3.2.22は安定材を9、12%添加したへどろCのエトリンガイトのX線回折強度と一軸圧縮強度との関係である。X線回折では厳密な定量はできないが、エトリンガイトの生成量と強度との間には、安定材の種類には無関係に線形関係が認められ、エトリンガイトの土粒子を拘束する処理効果が働いたためと考えられる。また、同じX線回折強度でも養生日数の経過に従って強度が増加しており、エトリンガイト生成量以外に土粒子相互を固結させるC-S-H系反応生成物などの骨組み組織の重要性を示している。このことは石灰系のH-B-Lにおいて（図-3.2.20）、エトリンガイト生成量が多いにもかかわらず大きな強度が得られなかったことの理由の一つと考えられる。

### 3. 2. 6 生石灰および水砕スラグを添加した沖積粘土の強度特性と耐久性

#### (1) 生石灰および水砕スラグを添加した沖積粘土の強度特性

図-3.2.23は試料Dに生石灰と粒径0.85mm以下の水砕スラグを添加した養生日数と強度の関係である。そして、図-3.2.24、25は水砕スラグを細粒化した75 $\mu$ m以下とブレン値が4000 cm<sup>2</sup>/gのものである。いずれの処理土も養生日数の増加とともに強度の増加はみられるが、水砕スラグの粒径により大きな固化効果の違いが生じている。粗粒の水砕スラグを添加した処理土は無添加のものと同じ強度を示しており、水砕スラグを添加した効果がみられない。しかし、生石灰の添加により添加量の少ない5%でも7日から28日の養生にかけて強度は約2.5倍に増加している（図-3.2.23）。このことより試料Dは石灰との反応性という点においては硬化活性の高い試料といえる。

次に、水砕スラグが75 $\mu$ m以下のものでは石灰、および水砕スラグの添加量に応じて養生に伴う強度増加が大きくなっている。特に、初期強度は石灰と水砕スラグ添加量の合計の多いもので大きな強度を示しており、一方、長期養生では水砕スラグ添加量の多い配合で高強度になっており、水砕スラグが長期の強度発現に貢献していることが明らかである。

さらに、水砕スラグが細粒化し、ブレン値が4000 cm<sup>2</sup>/gのものでは養生初期から長期にわたる強度発現傾向が一層顕著となり、石灰と水砕スラグの添加量の多いものが高強度を示している。そして、生石灰10%、水砕スラグ5%以上の配合では路盤材料の基準<sup>21)</sup>、10日養生で7 kgf/cm<sup>2</sup>を達成しており、高強度材料としての可能性も考えられる。

図-3.2.26は安定材の配合と28日養生後の強度の関係を示している。同じ石灰添加量でも水砕スラグの添加によって強度の増加する傾向がよくわかる。また、水砕スラグの粒径の違いによる固化効果をみると、硬化活性の最も低い0.85mm以下の粒径では水砕スラグ添加量に関わら

ず低い強度であり、石灰添加量の違いによる強度の差はみられない。一方、最も活性の高いブレン値が $4000\text{cm}^2/\text{g}$ のものでは水砕スラグ添加量の増加による強度増加は著しくなっている。しかし、石灰添加量の違いによる固化効果についてみると、水砕スラグ量が同じものは石灰添加量に関係なくほぼ同じ強度になっていることがわかる。これは石灰添加量が5%で10%と同じ程度の硬化反応が起こったことを示しており、水砕スラグを細粒化したため硬化活性が良くなった結果と考えられる。次に、水砕スラグが中位の粒径 $75\mu\text{m}$ 以下のものでは5%以上の添加で石灰添加量による強度発現に違いがあり、石灰添加量が10%のものは5%に比べ長期にわたる強度の増加がみられる。

表-3.2.7は水砕スラグの硬化に関係深い反応性元素の溶出試験の結果である。ここで、 $75\mu\text{m}$ 以下の水砕スラグは $0.85\text{mm}$ 以下を破碎したものであり、ブレン値が約 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ のものは異なる水砕スラグから製造したものである。化学成分の違いもあり単純に比較することはできないが、水との混合から時間が経過するに従い、また、水砕スラグの粒径が小さくなるに伴い反応性元素の溶出量の増加がみられ、強度増加の原因になったものと考えられる。

以上の結果、水砕スラグの添加は長期的な強度の増加がみられるが、その増加の程度は水砕スラグの粒径などの硬化活性の違いによるところが大きく、また、水砕スラグの活性の程度の違いにより強度増加に貢献する最も適した石灰添加量が決定できることが明らかになった。

## (2) 生石灰および水砕スラグを添加した沖積粘土の耐久性

安定処理土の実際への適用に際しては必要とする目標強度を達成することはもちろんであるが、環境の変化に対する耐久性の良いことが要求される。ここでは安定処理土の乾燥と水浸の繰り返しに対する耐久性について検討する。

耐久性の程度を表わすものとして残留土質量率とスレーキング率<sup>22)</sup>を用いた。これらは次式によって求められる。

$$\text{残留土質量率}(\%) = \frac{\text{耐久性試験後有孔アクリル板に残留している土の質量}}{\text{耐久性試験前の供試体の質量}} \times 100$$

$$\text{スレーキング率}(\%) = \left\{ 1 - \frac{\text{耐久性試験後の粗粒率}}{\text{耐久性試験前の粗粒率}} \right\} \times 100$$

残留土質量率は耐久性試験前の質量に対する所定サイクル経過後に有孔アクリル板上に残留している土の質量率であり、供試体が崩壊しないで残った量を表わす。一方、スレーキング率は処理土供試体の粗粒率の変化を表わし、この値が大きいほど供試体が細粒化していることを示すものである。これらの指標によって安定処理土の耐久性を量と質の二つの面より考えている。

写真-3.2.21, 22は耐久性サイクル数1、5に対する供試体の変化の様子を示している。図-3.2.27は、耐久性試験を1、3、5サイクル行った後の残留土質量率をプロットしたものである。これによると耐久性試験のサイクル数の増加に従って残留土質量率が減少し、処理土の崩壊が進行することがわかる。また、石灰添加量10%のものは5%および無添加のものに比べて明らかに残留土質量率は大きくなっており、供試体の崩壊が起こりにくいことを示している。図-3.2.28は7、14日間養生した供試体の安定材の配合に対する耐久性試験5サイクル終了後のスレーキング率を示したものである。また、図-3.2.29は、細粒化の状態を粒径加積通過曲線で表わしたものである。これらによると、石灰添加量10%は5%に比べてはるかにスレーキング率が低くなっており、細粒化しにくいことがわかる。また、同じ石灰添加率であれば、硬化活性のあまり高くはない0.85mm以下の粒径の水砕スラグであるが、添加量を増加することにより供試体の細粒化を防ぐ効果もみられる。さらに、水砕スラグ添加量の増加分量が同じでも、石灰添加量の多い試料ほどスレーキング率の減少量は大きくなる。すなわち、石灰添加量の増加によって水砕スラグの単位量当りの耐久性の効果の大きくなることがわかる。これらの結果は、56日間の長期養生の供試体においてもほぼ同じ耐久性の傾向を示している（図-3.2.30）。また、養生方法の違いでは湿潤養生の方が気乾養生に比べて細粒化しにくいようであり、供試体中の水分の存在による水砕スラグの固化効果が表れたものと考えられる。

図-3.2.31は、耐久性試験5サイクル終了後の残留土質量率とスレーキング率との関係を示したものである。これによると、石灰添加量5%では水砕スラグ添加による処理効果はあまりみられず、石灰添加量10%では水砕スラグの添加や、添加量に応じて試料の耐久性に貢献していることが確認できる。ここで用いた0.85mm以下の粒径の水砕スラグは強度試験では固化効果のみられなかったものであるが、耐久性の試験条件があまり厳しくなかったために耐久性の違いとして表れたものである。また、残留土質量率とスレーキング率とはほぼ一次的な関係があり、各種の配合比の供試体が、耐久性試験により速度は異なっているが、ほとんど同じような形態で劣化が進んでいることがわかる。一方、75 $\mu$ m以下の水砕スラグを添加した耐久性試験では固化強度が大きく供試体の崩壊や細粒化はみられなかった。

以上の結果、安定処理土の耐久性は強度試験の結果とほぼ同じ傾向を示しており、強度が大きな安定材の配合のよいことがわかった。

### 3. 2. 7 石灰・セメント系安定材によるへどろ、沖積粘土の強度発現の定式化と最適処理条件の推定

#### (1) へどろ処理土の強度発現の定式化と最適処理条件の推定

表-3.2.8は各種の安定材の配合および添加率について3、7、28日の強度試験の結果を養生日数(X)と強度(Y)の関係について回帰分析を行ったものである。なお、回帰式は2章2.2に示した5種類の式をあてはめている。データ数が少ないため複数の回帰式の相関係数が0.9以上になっており、ほとんどの配合および添加率で式(5)の相関係数が最も高くなっている。これはへどろ処理土の強度増加が比較的養生初期に顕著であり、長期にわたる強度発現が小さいことを示している。回帰係数を示した図-3.2.32、33によるといずれの安定材でも添加率3%の回帰係数A、Bはともに約10程度であり強度は小さくなっている。しかし、添加量を増加するとHBLのA値を除いて回帰係数は減少しており、添加率12%と比較すると長期強度に影響の大きな係数Bの値はHKとHBKが約0.16に対し、HCとHBCは約0.40程度であり長期強度の違いを示している。また、HCのA値はB値が同じHBCと比べて約0.4大きな値となり養生初期の強度発現が小さいことを示している。一方、HBLは添加率の増加により係数Bが10から1.3程度にまで減少しているが、係数Aの値が大きいため強度はあまり大きくならない。図-3.2.34、35および表-3.2.8は最も適合性がよいと考えられる式(5)による回帰式と実験値との関係を示したものである。ここで、28日強度の誤差は回帰式による強度の推定値と実験値との差を実験値に対する百分率で示したものであり、推定値の実験値に対する適合性を表す指標である。養生初期では反応性の良いHKで実験値が推定値を約20%上回る部分もみられるが、28日の長期養生ではすべての安定材の誤差は約1%以下になり、回帰式が強度発現を精度良く表しているものと考えられる。そして、安定材の種類および安定材添加量の増加による強度発現の傾向も回帰係数と良く適合していることがわかる。

次に、図-3.2.36に示すように横軸を1/X、縦軸を1/Yとして、養生初期(3、7日)の強度試験の結果を用いて回帰式(5)にあてはめ、長期(28日)の強度を推定した結果が表-3.2.9である。ほとんどの強度の誤差が負の符号であり、実験値の方が回帰式による推定値より高い強度を示している。この傾向は硬化反応性の良い特殊セメントを用いた記号HKと石灰添加量の多いHBLで大きく、長期にわたる強度発現が顕著であることを示しており、長期強度を推定する際の安全率や安定材の割増しなどに考慮する必要がある。

以上の結果、石灰・セメント系安定材を添加したへどろの強度発現は次の回帰式(5)で表されることがわかり、養生初期の強度増加が顕著であり、長期にわたる強度発現が比較的小さいことがわかった。



$$Y = \frac{X}{A + B X} \quad (5)$$

ここで、Y : 一軸圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

X : 養生日数 (日)

A、B : 回帰係数

この原因は使用したへどろは粘土鉱物含有量が少なく、硬化活性の小さいものであり、処理土の強度発現は安定材の固化によるところが大きく、また、使用した安定材はいずれの配合もセメントやC A S 材の含有量が多いため、比較的養生初期の強度発現が顕著であったためである。

また、安定処理土の強度発現の定式化が可能となり、安定処理対象土および安定材の硬化反応性から、最も適合する回帰式を採用することによって、養生初期の強度から長期強度の推定が可能となり、推定値の誤差の傾向も予測でき、安定処理土の品質管理に役立つものと考えられる。

## (2) 沖積粘土処理土の強度発現の定式化と最適処理条件の推定

表-3.2.10は沖積粘土処理土の一軸圧縮試験の結果を供試体の養生日数と強度の関係について回帰分析を行った結果である。相関係数0.9以上の回帰式はそれぞれの配合で3つ以上あり、式(2)、式(4)が比較的多くの場合に適しているが、配合の違いによる比較を行うために、全ての配合に共通で、相関係数の合計が最も高い次の式(4)が最適回帰式として選択できる。

$$Y = A X^B \quad (4)$$

回帰式(4)は養生初期の強度は式(5)に比べて小さいが、長期間にわたり強度発現が続くものであり、石灰と水砕スラグを添加した処理土がセメントや石灰単独の処理土に比べ、長期にわたる硬化反応性がよいことを示している。

図-3.2.37, 38は水砕スラグの添加量に対する養生日数と強度との関係を回帰式(4)を用いて示している。粗粒の0.85mm以下の水砕スラグは添加量の増加に対する強度の伸びはみられないが、細粒化したブレン値が4000cm<sup>2</sup>/gの水砕スラグでは添加量の増加に対し、強度増加は著しいものになっている。水砕スラグの粒径に対する回帰係数を示した図-3.2.39によると基本的な回帰式の形を決定するBの値はいずれの粒径のスラグとも同じ値であり、養生の経過による強度増加率がよく似た傾向であることを示している。しかし、回帰係数Aは水砕スラグの添加量の増加や、その細粒化に従って大きな値となり、その結果、養生初期の強度に大きな違いが生じている。一方、石灰添加量の違いによる固化効果を水砕スラグ10%添加したもので比較すると(図-3.2.40)、水砕スラグが最も細粒の4000cm<sup>2</sup>/gブレンのものでは石灰添加量

が5%の回帰係数は $A = 4.279$ 、 $B = 0.573$ であり、10%添加したものは $A = 4.052$ 、 $B = 0.576$ となっており、ほぼ同様の強度発現傾向を示している。この石灰添加量の違いに関わらず同程度の大きな固化効果を示していることは水砕スラグの硬化活性がよく、強度増加への貢献度が大きなことを表している。

また、細粒の程度が中位である $75\mu\text{m}$ 以下の水砕スラグをみると、回帰係数 $B$ は石灰添加量5%の方が10%に比べ若干大きな値になっているが、 $A$ の値は10%のものが5%の約2倍になっており、石灰添加量の多い配合で高強度になることがわかる。これは石灰によるアルカリ雰囲気により水砕スラグの硬化活性に違いがあることを示しており、 $75\mu\text{m}$ 以下の水砕スラグは4000ブレーンの水砕スラグに比べて硬化活性の劣っていることがわかる。

一方、最も粗粒の $0.85\text{mm}$ 以下の水砕スラグでは回帰係数がほとんど1以下の値となり、石灰添加量に関わらず、水砕スラグを添加した固化効果がみられず硬化反応性は大変低いものである(図-3.2.41)。しかし、回帰係数 $A$ と $B$ の値を比較すると、水砕スラグが細粒の4000ブレーンのものは粒径が $75\mu\text{m}$ および $0.85\text{mm}$ 以下のものに比べ、養生の経過に対する強度増加率はほぼ同じであるが、強度は $75\mu\text{m}$ 以下の水砕スラグの1.0~2.6倍、また、 $0.85\text{mm}$ 以下の水砕スラグの3.5~4.7倍の大きな値が得られており、水砕スラグ粒子の細粒化による活性の良さを示している。以上の結果、これらの回帰係数の関係より安定材および処理土の固化特性や強度発現傾向を定量的に比較、検討することが可能であり、回帰式は土質安定処理の目標強度や処理期間に見合った合理的な配合設計に役立つものと考えられる。

### 3. 2. 8 本節のまとめ

へどろや沖積粘土のような有機物含有量が多く、含水比の高い軟弱粘性土は運搬や廃棄場所の確保および材料としての再利用が大きな問題となっている。これらの軟弱粘性土を固化処理し、建設材料として再利用することを目的として、セメントと石灰を主材とし、C A S材や石膏を助材に用いて、処理効果を追究した。また、有機物中のフミン酸が改良強度に与える影響についても考察した。さらに、沖積粘土を用いて乾燥と水浸の繰り返しに対する耐久性について検討を加えた。

得られた結果をまとめると次のとおりである。

- (1) へどろの固化において、処理効果はへどろの粒度分布や粘土鉱物などに大きく影響され、安定材による硬化反応とともに、処理土の含水比の減少や塑性の改良によって強度が増加する。
- (2) C A S材や石膏などの安定材の種類による処理効果は、処理対象土の有機物含有量やそ

の種類により大きく異なる。石灰系安定材に比べ、セメント系安定材は高強度が得られるが、有機物（フミン酸）が強度発現を阻害する影響は石灰系安定材の方が少ない。しかし、フミン酸の種類による強度への影響の違いについては今後の検討課題である。

- (3) へどろ中の有機物を除去することにより、セメント単独の添加だけでも大きな処理効果が得られた。さらに、有機物を多く含有するへどろに対してはエトリングイトの生成による処理効果の有効性が確認された。
- (4) セメント系安定材12%程度の添加によって、養生3～7日で1.0kgf/cm<sup>2</sup>の一軸圧縮強度が得られ、路床および埋立て材料としての利用が可能となった。また、耐久性などの検討が必要であるが、セメント系特殊安定材や水砕スラグの併用により路盤材料としての可能性も考えられる。
- (5) セメント系安定材の9%以上の添加によりC A S材の固化助材としての効果がみられ、特に、養生初期の強度増加が顕著になる。
- (6) へどろ処理土の強度増加はエトリングイトの生成量と線形関係が見られる。しかし、C S H系反応生成物などによる供試体の剛性の程度によりエトリングイトの強度への貢献度は大きく異なる。
- (7) 石灰安定処理で水砕スラグの添加は長期的な強度の増加がみられ、その増加の程度是水砕スラグの粒径などの硬化活性の違いによるところが大きい。また、水砕スラグの活性の違いにより強度増加に貢献する最も適した石灰添加量が決定できる。
- (8) 安定処理土の耐久性は強度試験の結果とほぼ同じ傾向を示しており、強度の大きな安定材の配合が良好な耐久性を示す。そして、処理土の劣化は細粒化と崩壊が同じ傾向で進行する。
- (9) 硬化活性の小さなへどろを用い、C A S材やセメントの含有量の多い石灰・セメント系安定材を添加した処理土の強度発現は次の回帰式(5)で表され、養生初期の強度増加が顕著であり、長期にわたる強度発現が比較的小さいことがわかった。

$$Y = \frac{X}{A + B X} \quad (5)$$

一方、水砕スラグを添加した硬化活性の高い沖積粘土の石灰安定処理土の強度発現は次の回帰式で表され、長期にわたる強度発現がみられる。

$$Y = A X^B \quad (4)$$

- (10) 安定処理土の強度発現を定式化することにより、安定材および処理土の固化特性や強度発現傾向を定量的に比較、検討することが可能であり、土質安定処理の目標強度や処理工期に見合った合理的な配合および養生方法の設計に利用できる。また、施工面では養生初

期の強度から長期強度の推定が可能となり、安定処理土の品質管理に役立つものと考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) 阪口豊、高橋裕、鎮西清高：日本の地形、科学、Vol. 46, No. 4, pp. 223～247, 1976.
- 2) 松尾新一郎、嘉門雅史：物理化学的見地からのいわゆるヘドロの工学的性質について、土木学会論文報告集、No. 209, pp. 103～113, 1973.
- 3) 木次恭一、小関征三：ヘドロの固化処理に関する材料及び技術について、工業用水、No. 207, pp. 26～45, 1975.
- 4) 大場正男：土中の有機物がセメンティング効果に及ぼす影響、土木技術資料、土木研究センター、Vol. 10, No. 12, pp. 606～611, 1968.
- 5) 喜田大三、久保 博、漆原知則：へどろ・軟弱土処理における各種固化材の比較検討、材料、Vol. 31, No. 341, pp. 176～187, 1982.
- 6) 喜田大三、久保博：へどろ対策工法、土と基礎、Vol. 29, No. 5, pp. 53～60, 1981.
- 7) 吉田龍夫、喜田大三：セメント・石灰系材料による底質の固化処理、セメント・コンクリート、No. 391, pp. 81～88, 1979.
- 8) 嘉門雅史：超軟弱粘土の工学的性質とその安定処理に関する研究、京都大学学位請求論文、1979.
- 9) 例えば日本石灰協会、土質安定処理工法委員会：石灰による土質安定処理工法、p. 10, 1970.
- 10) 嘉門雅史：ヘドロの工学的特性について、土と基礎、Vol. 26, No. 1, pp. 19～24, 1978.
- 11) 国土開発技術研究センター：廃棄物の建設事業への利用可能性に関する調査報告書、p. 149, 1982.
- 12) 松尾新一郎、澤孝平、友久誠司：水砕スラグを添加した石灰安定処理土の耐久性について、第36回土木学会年次学術講演会概要集第3部、pp. 706～707, 1981.
- 13) M. Kamon, S. Tomohisa, K. Tsubouchi: The Utilization of Various Waste Materials by Cement Hardening、Review of the 41st General Meeting, Technical Session, The Cement Association of Japan, pp. 84～87, 1987.
- 14) 澤孝平、友久誠司：ため池に堆積するヘドロの安定処理について、土質安定材料シンポジウム論文集、日本材料学会、pp. 55～60, 1987.
- 15) 嘉門雅史、澤孝平、友久誠司：セメント系固化材によるヘドロの安定処理に関する研究、材料（日本材料学会）に投稿中
- 16) 土質工学会、土質試験基準検討委員会：安定処理土の締固めをしない供試体作製方法、土と基礎、Vol. 37, No. 1, pp. 77～78, 1989.

- 17) 土質工学会編：団粒分析試験、土の試験・調査実習書、pp.83～87, 1975.
- 18) 久楽勝行、三木博史、岡田芳樹：土中のフミン酸が土質改良効果に及ぼす影響、土木技術資料、土木研究センター、Vol26, No.8, pp.405～410, 1984.
- 19) セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル、p.45, 1985.
- 20) 大場正男：土中の有機物がセメンティング効果に及ぼす影響、土木技術資料、土木研究センター、Vol.10, No.12, pp.606～611, 1968.
- 21) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱、pp.2～20, 1982.
- 22) 大住明夫、今川史郎：スレーキング試験の一提案、第13回土質工学研究発表会講演集、pp.1121～1124, 1978.

表－3.2.1　へどろの化学成分

試料名	へどろ A	へどろ B	へどろ C
SiO <sub>2</sub>	58.0	63.1	48.0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.7	14.9	20.0
CaO	1.2	0.6	1.2
TiO <sub>2</sub>	0.7	0.7	1.0
K <sub>2</sub> O	1.5	1.4	0.9
Na <sub>2</sub> O	0.8	0.4	0.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.7	3.1	10.3
MgO	0.7	0.5	1.2

表－3.2.2　へどろの物理的性質

試料名	へどろ A	へどろ B	へどろ C
自然含水比（％）	225	127	187
液性限界（％）	74.3	76.3	198
塑性限界（％）	54.4	50.5	76.7
塑性指数	19.9	25.8	121.3
比重	2.19	2.15	2.56
強熱減量（％）	18.4	14.0	14.7
砂分（75 $\mu$ m以上）（％）	38.2	22.5	8.5
シルト分（5～75 $\mu$ m）（％）	44.6	52.5	77.0
粘土分（5 $\mu$ m以下）（％）	17.2	25.0	14.5
D <sub>60</sub> （mm）	0.0600	0.0170	0.0243
D <sub>30</sub> （mm）	0.0084	0.0085	0.0092
D <sub>10</sub> （mm）	0.0027	0.0028	0.0039
均等係数 U <sub>c</sub>	22.2	6.1	6.2
曲率係数 U <sub>c</sub> '	0.44	1.52	0.89

表－3.2.3 安定材の配合

(単位：%)

配合記号	セメント	セメント系 特殊安定材	消石灰	C A S 材	石 膏
H C	100	—	—	—	—
H B C	95	—	—	5	—
H B L	—	—	70	30	—
H G C	70	—	21	9	—
H G C S	66.5	—	20	8.5	5
H K	—	100	—	—	—
H B K	—	95	—	5	—

表－3.2.4 沖積粘土の物理的性質

試 料 名	試料D	試料E
液性限界 (%)	110.2	86.0
塑性限界 (%)	40.7	40.7
塑性指数	69.5	45.3
比 重	2.71	2.71
砂分 (75 $\mu$ m以上) (%)	2.9	28.6
シルト分 (5～75 $\mu$ m) (%)	68.1	47.4
粘土分 (5 $\mu$ m以下) (%)	29.0	24.0
D <sub>60</sub> (mm)	0.0175	0.0630
D <sub>30</sub> (mm)	0.0050	0.0080
D <sub>10</sub> (mm)	0.0001	0.0014
均等係数 U <sub>c</sub>	175	45.0
曲率係数 U <sub>c</sub> '	14.3	0.73



表-3.2.5 へどろ A に対するへどろ B の強度比

(28日養生)

添加率	6 %			9 %			12 %		
配合記号	一軸強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		強度比 B / A	一軸強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		強度比 B / A	一軸強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		強度比 B / A
	へどろ A	へどろ B		へどろ A	へどろ B		へどろ A	へどろ B	
H C	0.28	0.08	0.29	1.16	1.22	1.05	1.32	1.92	1.45
H B C	0.17	0.16	0.94	1.11	1.25	1.13	1.39	2.28	1.64
H B L	0.10	0.04	0.40	0.34	0.13	0.38	0.45	0.36	0.80
H G C	0.35	0.15	0.43	0.65	0.95	1.48	0.60	1.14	1.90
H G C S	0.32	0.16	0.50	0.77	1.40	1.82	0.62	1.75	2.82

表-3.2.6 フミン酸の抽出試験結果

(単位: %)

試料名	p H 値		
	3	5	7
へどろ A	2.88	1.48	0.61
へどろ B	2.55	0.14	0.23
へどろ C	1.91	0.25	0.15

表-3.2.7 水砕スラグの溶出試験結果

(mg/l)

水砕スラグの種類	分析時期	C a	A l	S i	S
粒径0.85mm以下	加水直後	9.9	0.78	2.0	5未満
	加水7日後	23	1.7	6.8	5未満
粒径75μm以下	加水直後	22	1.1	4.1	8.0
	加水7日後	69	1.8	9.8	9.1
ブレン値 (約4000cm <sup>2</sup> /g)	加水直後	52	0.76	3.8	470
	加水7日後	60	0.70	9.1	520

表-3.2.8 安定処理土の配合と適合回帰式（へどろC）

配合記号	添加率 (%)	適合回帰式番号 (相関係数0.9以上)	最適回帰式(5)式			(5)式による推定値と実験値の誤差(%)		
			相関係数	回帰係数A	回帰係数B	3日養生	7日養生	28日養生
HC	3	5, 2, 1, 4, 3	0.9993	10.697	6.777	-7.92	4.70	-0.23
	6	5, 2, 1	0.9993	1.463	1.499	-0.32	0.08	-0.06
	9	5, 4	0.9921	1.098	0.767	-4.57	2.60	-0.76
	12	5, 2, 4	0.9902	0.830	0.386	-2.00	-1.35	-0.72
HBC	3	5, 2	0.9996	10.074	7.345	-6.56	3.50	-0.16
	6	5, 2, 4, 1, 3	0.9996	1.403	1.467	-4.29	2.51	-0.13
	9	5, 1, 3, 2, 4	0.9994	0.888	0.639	-9.37	5.73	-0.27
	12	5, 1, 3, 4, 2	0.9991	0.498	0.356	-9.78	6.01	-0.30
HK	3	5, 1	0.9967	17.689	9.426	-18.42	11.55	-0.57
	6	5, 1, 3, 2, 4	0.9934	1.952	0.660	-14.30	9.20	-0.75
	9	5, 4, 1, 2, 3	0.9986	0.749	0.244	-10.45	7.48	-0.39
	12	5, 1, 3, 4, 2	0.9979	0.373	0.157	-11.59	7.54	-0.42
HBK	3	5	0.9949	9.935	13.031	1.98	-1.14	-0.40
	6	5, 2, 4, 1, 3	0.9975	2.041	0.784	-3.15	2.14	-0.29
	9	5, 2, 4, 1	0.9985	0.810	0.276	-1.57	0.26	-0.08
	12	5, 4, 2	0.9865	0.408	0.171	-6.58	3.89	-1.21
HBL	3	5	0.9854	11.386	10.845	-2.42	0.23	-1.24
	6	5, 2, 4, 1, 3	0.9996	11.545	4.857	-4.28	2.46	-0.12
	9	5, 2, 4, 1, 3	0.9985	14.830	2.928	-5.89	4.30	-0.27
	12	4, 1, 5, 2, 3	0.9931	13.199	1.294	-9.93	8.45	-0.62

注1) 回帰式番号

- (1)  $Y = A + BX$
- (2)  $Y = A + B \cdot \log X$
- (3)  $Y = A \cdot 10^{BX}$
- (4)  $Y = A X^B$
- (5)  $Y = \frac{X}{A + BX}$

注2)

$$\text{強度の誤差 (\%)} = \frac{\text{回帰式による推定値} - \text{実験値}}{\text{実験値}} \times 100$$

表-3.2.9 養生初期強度（3，7日）による長期強度（28日）の推定（へどろC）

配合記号	添加率 (%)	最適回帰式（5）式		28日養生の強度（kgf/cm <sup>2</sup> ）		
		回帰係数 A	回帰係数 B	推定値	実験値	誤差（%）
H C	3	4.348	8.075	0.12	0.14	-13.20
	6	1.422	1.506	0.64	0.65	-0.43
	9	0.699	0.848	1.15	1.25	-8.36
	1 2	0.935	0.364	2.52	2.43	3.79
H B C	3	4.773	8.409	0.12	0.13	-10.34
	6	0.748	1.603	0.61	0.66	-7.00
	9	0.198	0.781	1.27	1.50	-15.17
	1 2	0.095	0.439	2.26	2.69	-15.80
H K	3	-4.375	13.958	0.07	0.10	-27.55
	6	0.514	0.952	1.03	1.38	-25.34
	9	0.340	0.328	2.94	3.72	-20.87
	1 2	0.118	0.210	4.68	5.89	-20.52
H B K	3	12.500	12.500	0.08	0.08	2.99
	6	1.678	0.859	1.09	1.17	-7.01
	9	0.760	0.284	3.21	3.28	-2.14
	1 2	0.255	0.202	4.74	5.45	-13.06
H B L	3	9.375	11.161	0.09	0.09	-3.34
	6	8.750	5.417	0.17	0.19	-8.13
	9	11.257	3.655	0.25	0.29	-15.00
	1 2	8.820	2.188	0.40	0.57	-29.92

注1）回帰式

$$(5) \text{ 式 } Y = \frac{X}{A + B X}$$

注2）

$$\text{強度の誤差（\%）} = \frac{\text{回帰式による推定値} - \text{実験値}}{\text{実験値}} \times 100$$

表-3.2.10 安定処理土の配合と適合回帰式（沖積粘土）

水砕スラグ の種類	配 合 (%)		適合回帰式番号 (相関係数0.9以上)	回帰係数 ((4)式)	
	石 灰	水砕スラグ		A 値	B 値
—	5 10	0 0	1, 4, 3, 2, 5 1, 4, 3, 2, 5	0.695 0.661	0.699 0.710
ブレン値 4000cm <sup>2</sup> /g	5	2 5 10	2, 4, 1, 5, 3 3, 1, 4, 2 2, 5, 4, 1, 3	0.777 1.576 4.279	0.801 0.667 0.573
		10	3, 1, 4, 2 2, 4, 5, 1, 3 2, 5, 4, 1, 3	1.093 2.064 4.052	0.710 0.669 0.576
	10	2 5 10	3, 1, 4, 2 2, 4, 5, 1, 3 2, 5, 4, 1, 3	1.093 2.064 4.052	0.710 0.669 0.576
粒 径 75μm以下	5	2 5 10	2, 4, 1, 3 1, 4, 3, 2 2, 4, 1	0.584 0.516 1.158	0.857 0.945 0.777
		10	2, 4, 1, 3 4, 5, 1, 2 2, 4, 5, 1, 3	0.462 1.611 1.997	0.911 0.630 0.689
	10	2 5 10	2, 4, 1, 3 5, 2, 4, 1, 3 1, 4, 3, 2, 5	0.378 0.969 0.931	0.884 0.641 0.669
粒 径 0.85mm以下	5	2 5 10	2, 4, 1, 3 5, 2, 4, 1, 3 1, 4, 3, 2, 5	0.378 0.969 0.931	0.884 0.641 0.669
		10	4, 5, 2, 1, 3 2, 4, 1, 5, 3 3, 1, 4, 2	1.354 0.769 0.716	0.477 0.707 0.708
	10	2 5 10	4, 5, 2, 1, 3 2, 4, 1, 5, 3 3, 1, 4, 2	1.354 0.769 0.716	0.477 0.707 0.708

注) 回帰式番号

- (1)  $Y = A + B X$   
(2)  $Y = A + B \cdot \log X$   
(3)  $Y = A \cdot 10^{BX}$   
(4)  $Y = A X^B$   
(5)  $Y = \frac{X}{A + B X}$

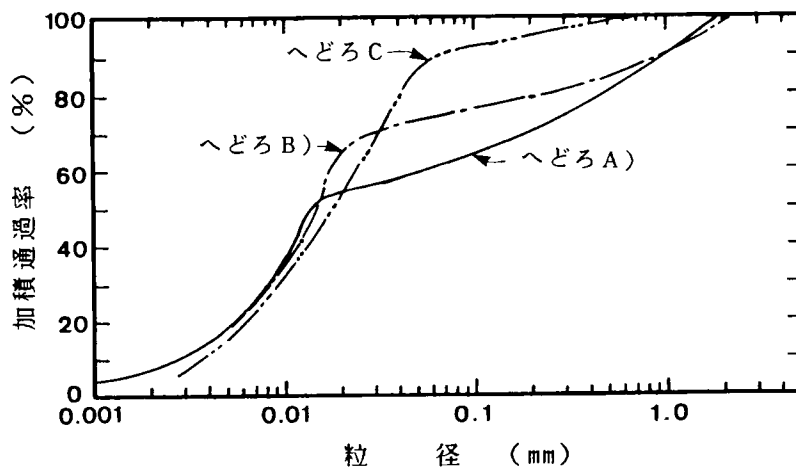


図-3.2.1 ヘどろの粒径加積曲線

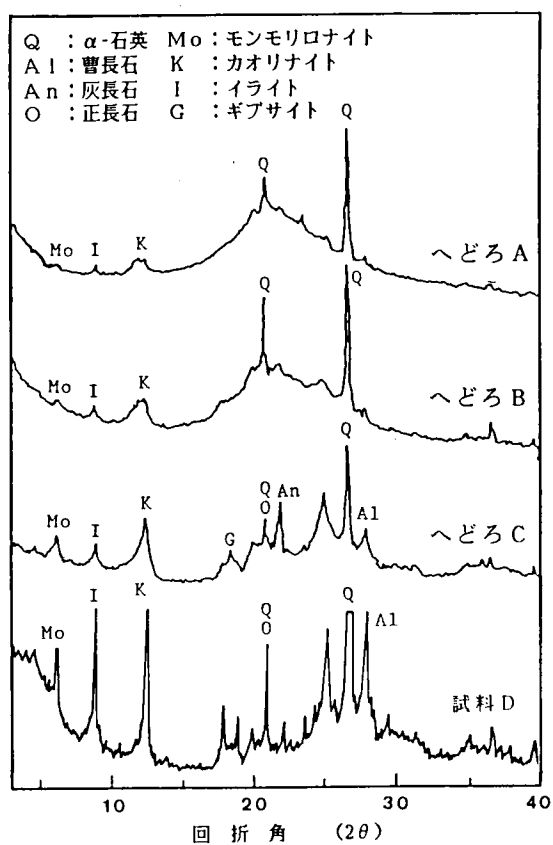


図-3.2.2 ヘどろおよび沖積粘土のX線回折結果

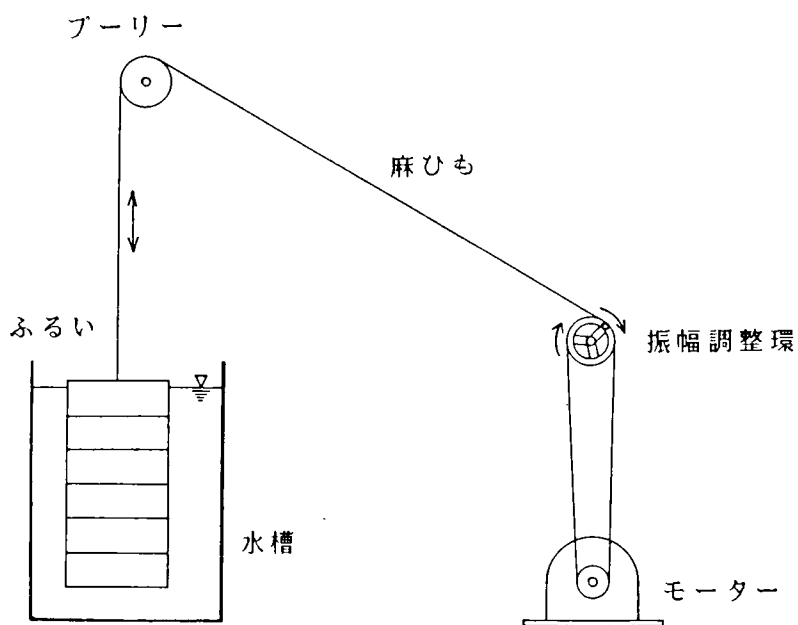


図-3.2.3 団粒分析装置の機構

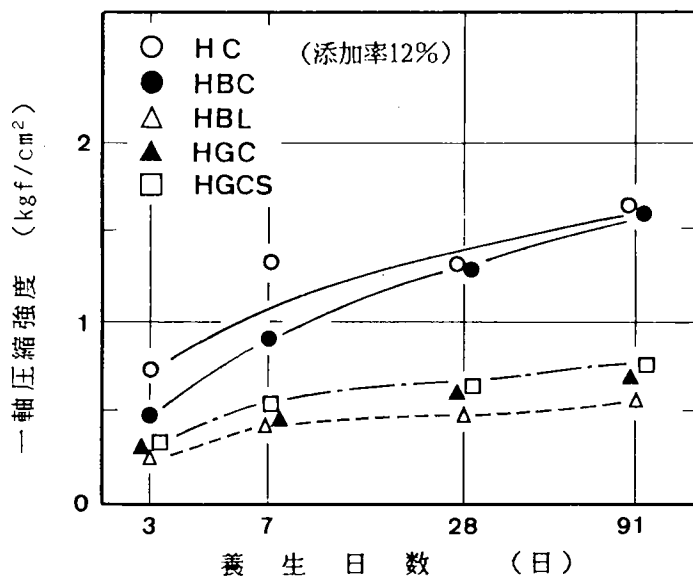


図-3.2.4 養生日数と強度の関係 (へどろA)

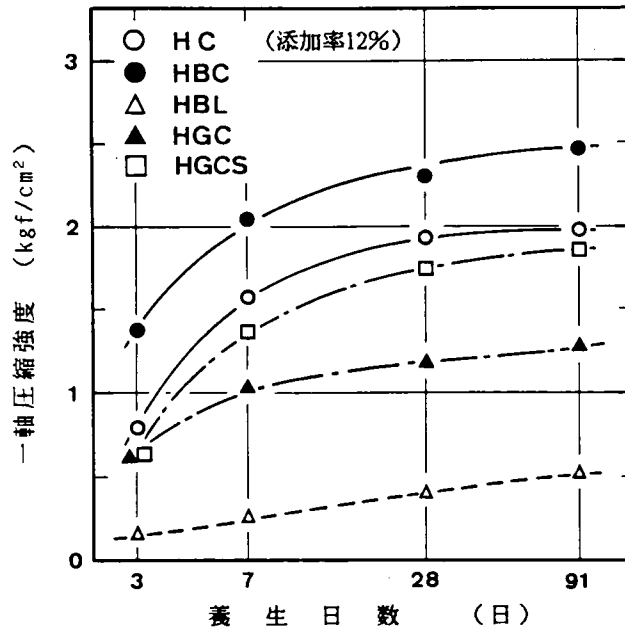


図-3.2.5 養生日数と強度の関係 (へどろ B)

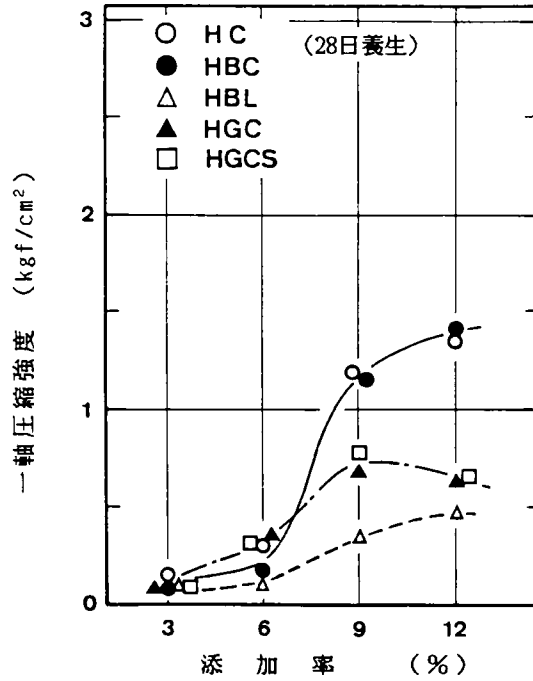


図-3.2.6 安定材添加率と強度の関係 (へどろ A)

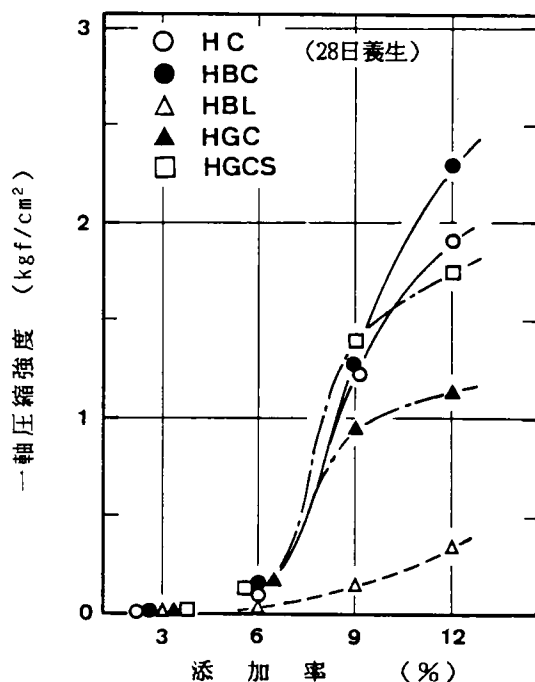


図-3.2.7 安定材添加率と強度の関係 (へどろ B)

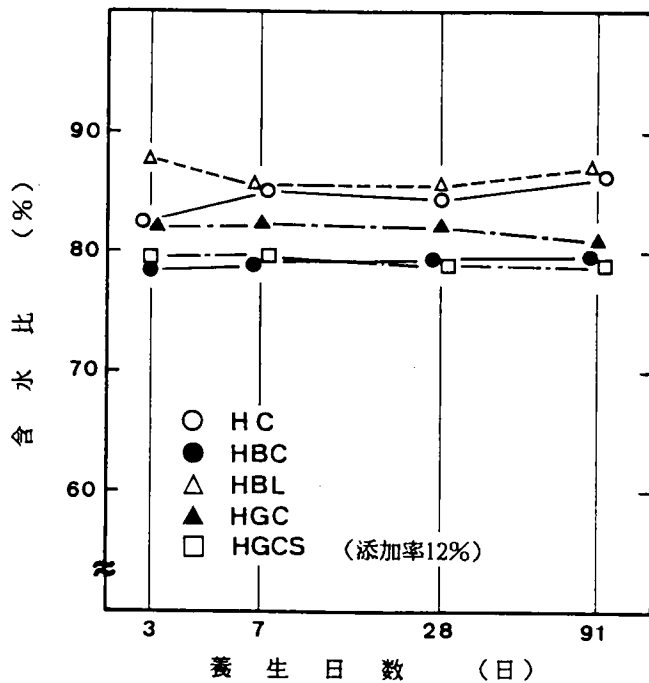


図-3.2.8 養生日数と含水比の関係 (へどろ B)



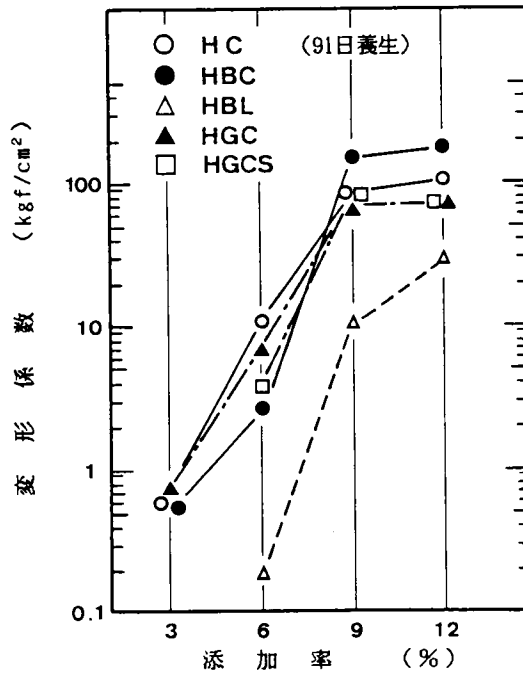


図-3.2.9 安定材添加率と変形係数の関係 (へどろ A)

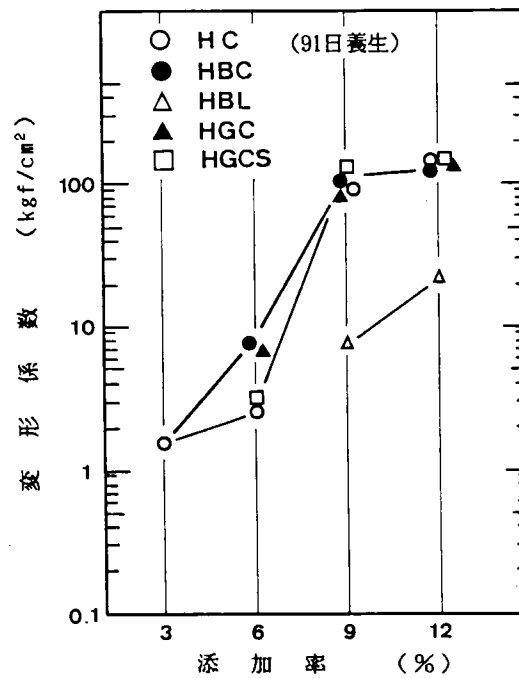


図-3.2.10 安定材添加率と変形係数の関係 (へどろ B)

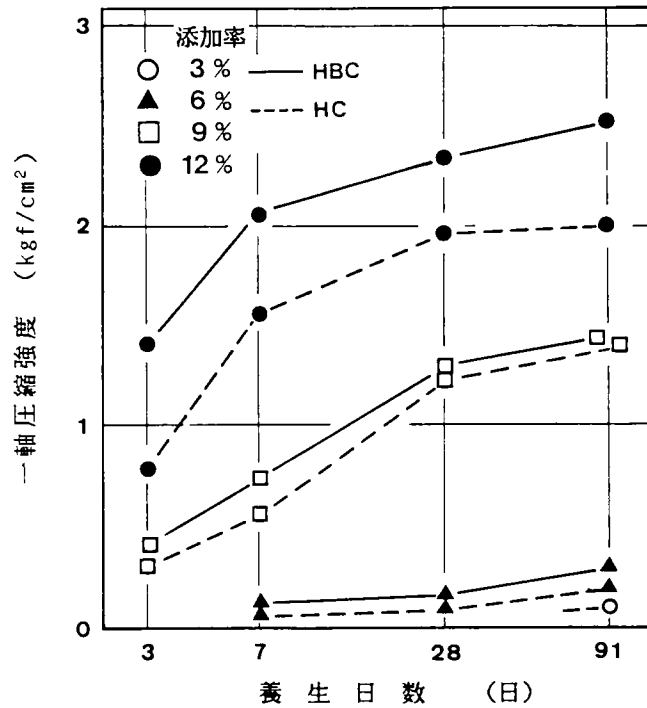


図-3.2.11 養生日数と強度の関係（へどろ B、HBC、HC）

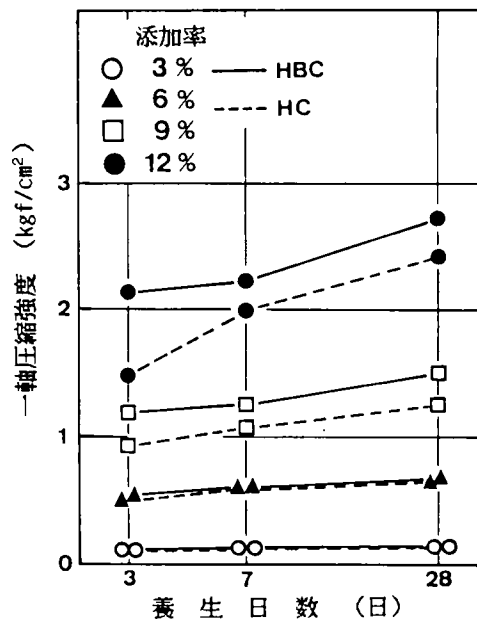


図-3.2.12 養生日数と強度の関係（へどろ C、HBC、HC）

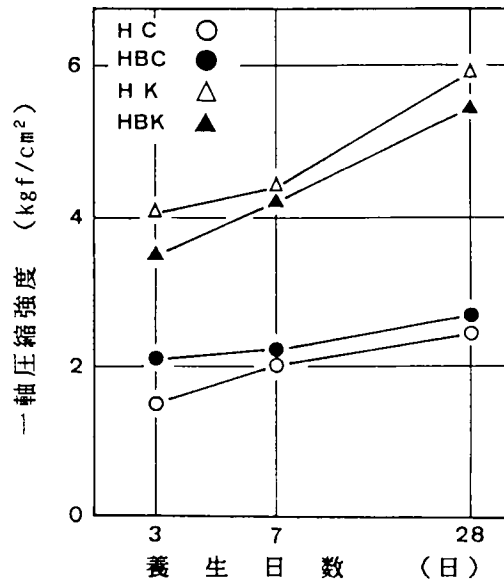


図-3.2.13 養生日数と強度の関係（へどろC、安定材添加率12%）

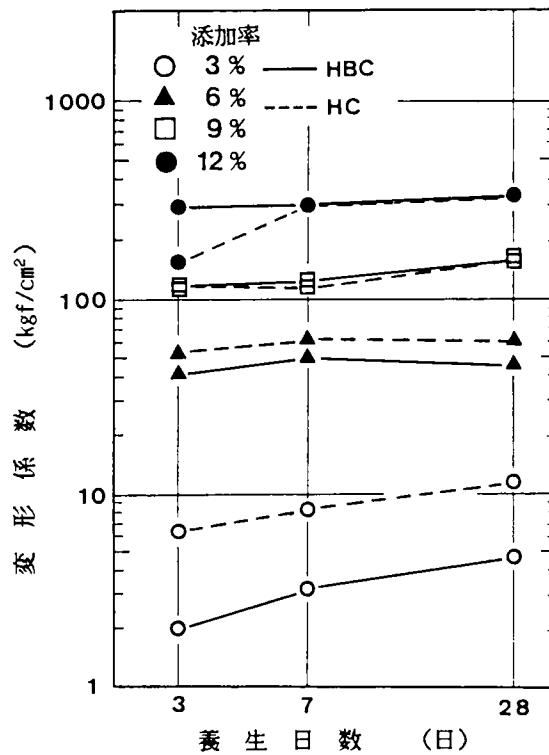


図-3.2.14 養生日数と変形係数の関係（へどろC、HBC、HC）

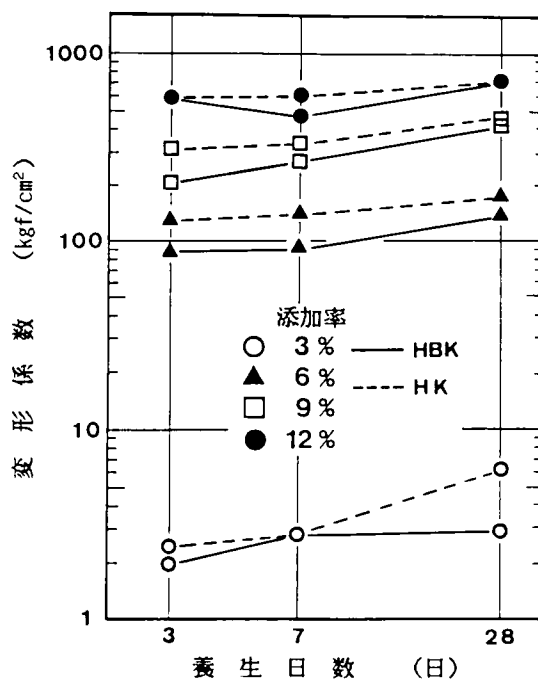


図-3.2.15 養生日数と変形係数の関係 (へどろ C、HBK、HK)

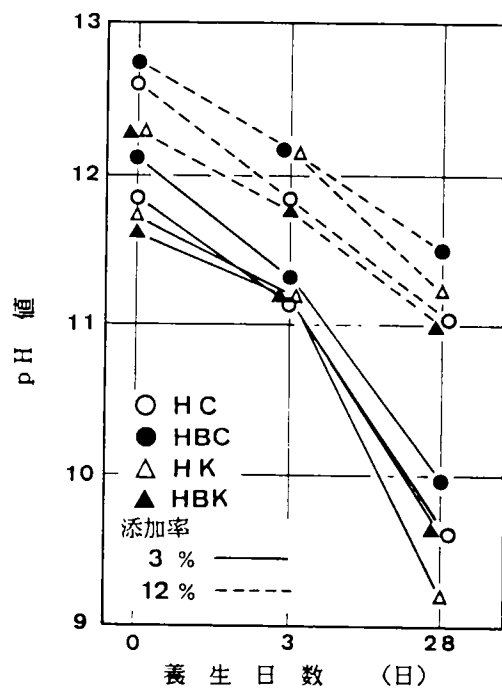


図-3.2.16 養生日数とpHの変化 (へどろ C)

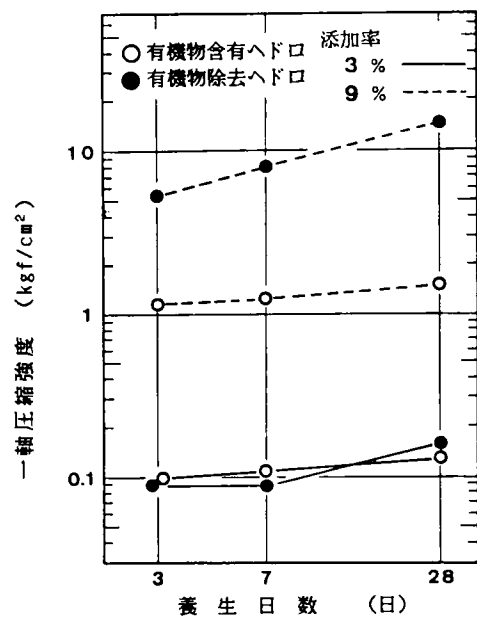


図-3.2.17 試料中の有機物の強度発現への影響  
(へどろ C、HBC)

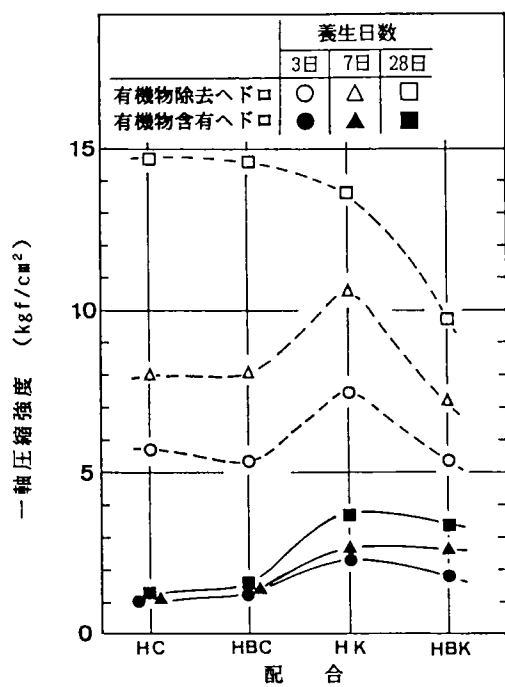


図-3.2.18 試料中の有機物と各種安定材の強度比較  
(へどろ C、安定材添加率 9%)

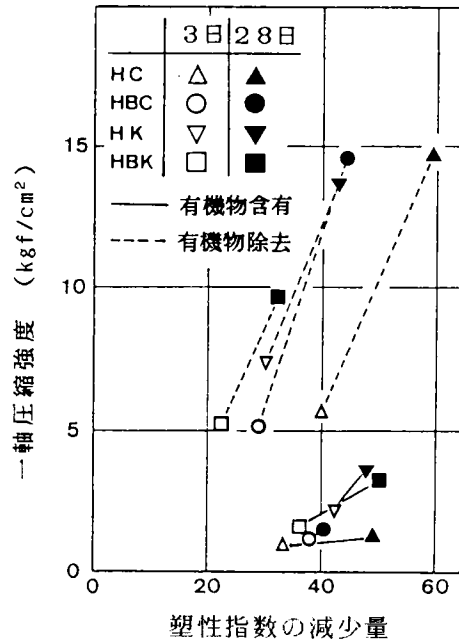


図-3.2.19 塑性指数の減少量と強度の関係  
(へどろC、安定材添加率9%)

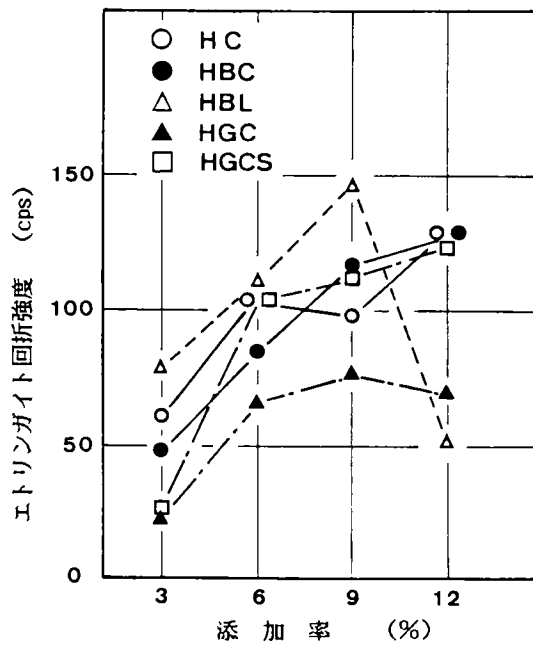


図-3.2.20 安定材添加率とエトリンガイトの  
X線回折強度の関係 (へどろA、28日養生)

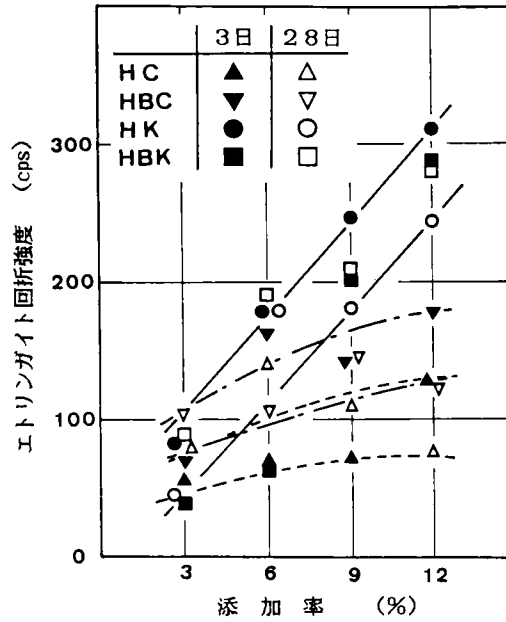


図-3.2.21 安定材添加率とエトリンガイトのX線回折強度の関係（へどろC、3、28日養生）

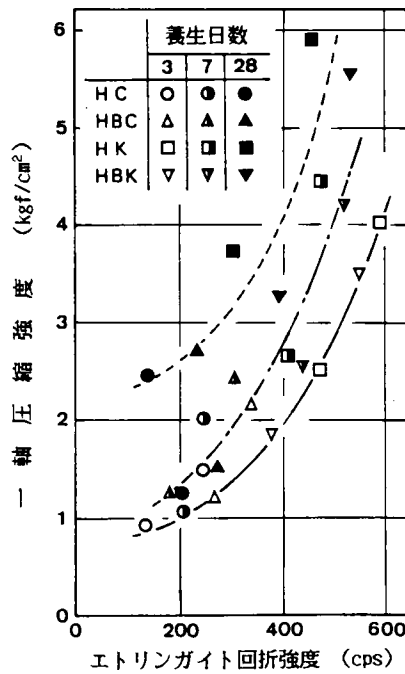


図-3.2.22 エトリンガイトのX線回折強度と強度の関係（へどろC）

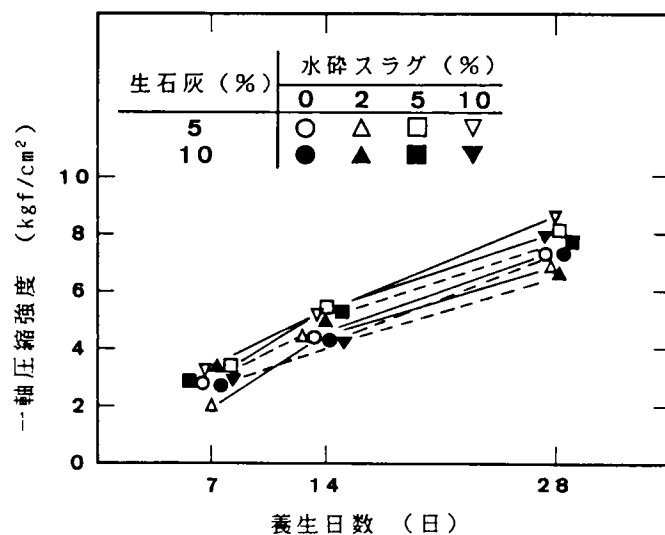


図-3.2.23 養生日数と強度の関係 (試料D、水砕スラグ0.85mm以下)

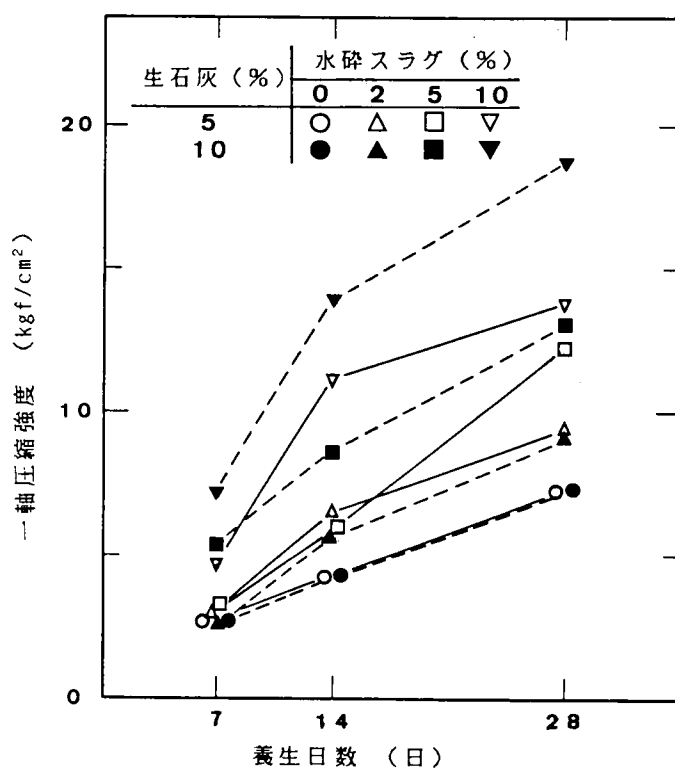


図-3.2.24 養生日数と強度の関係 (試料D、水砕スラグ75μm以下)



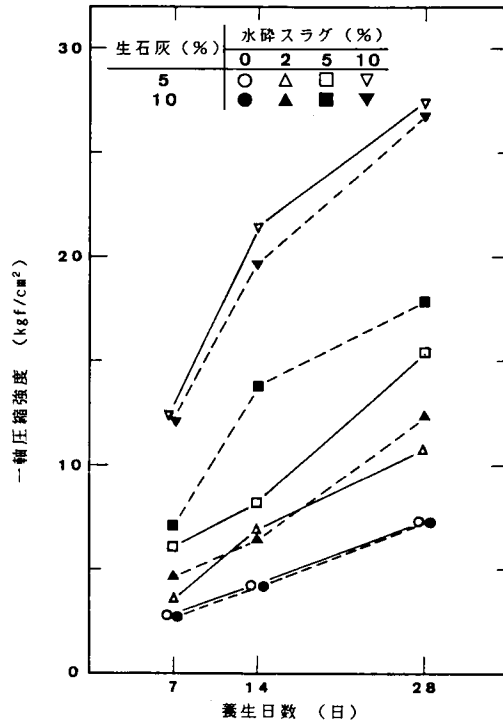


図-3.2.25 養生日数と強度の関係  
(試料D、水砕スラグのブレン値約4000cm<sup>2</sup>/g)

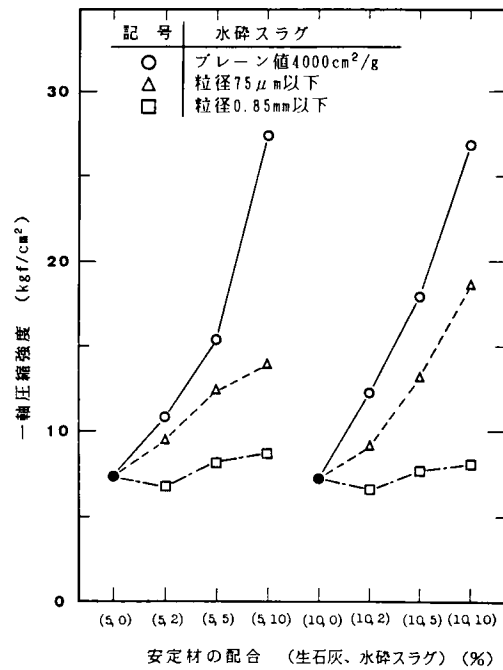


図-3.2.26 安定材の配合と強度の関係 (試料D、28日養生)

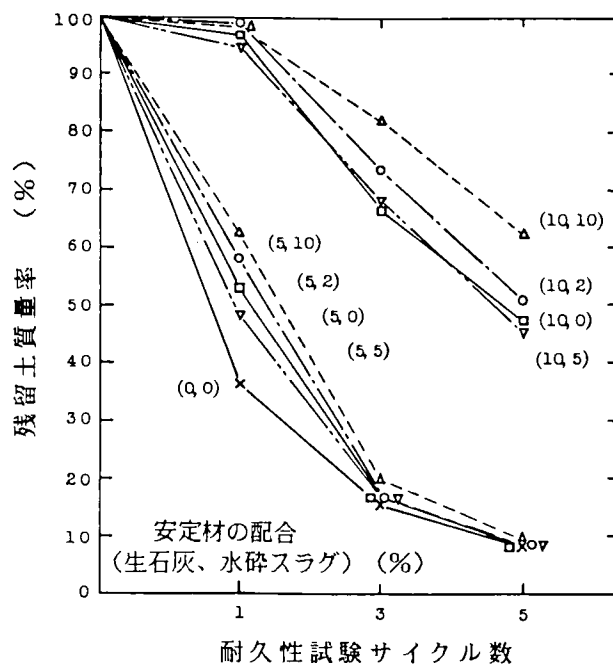


図-3.2.27 耐久性試験サイクル数と残留土質量率の関係 (試料E、14日養生)

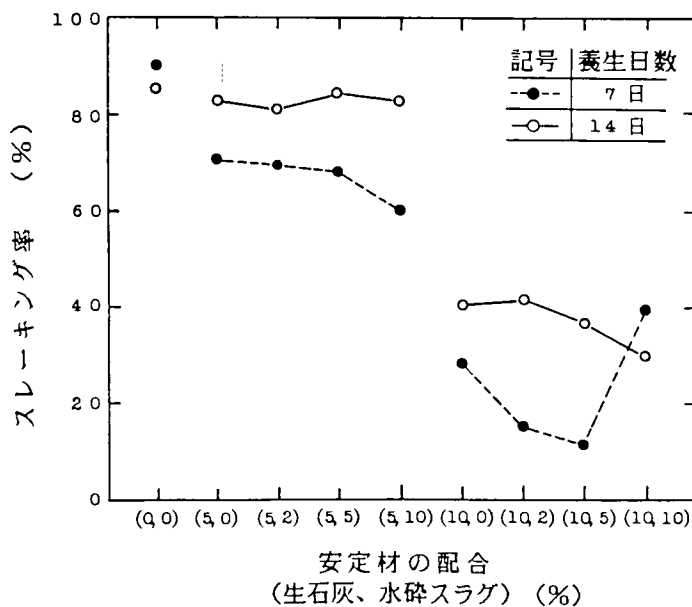


図-3.2.28 安定材の配合とスレーキング率の関係 (試料E、7、14日養生)

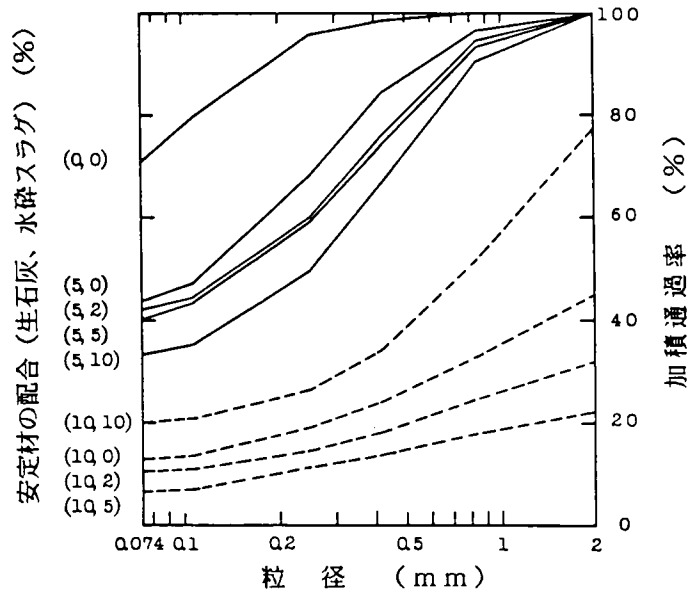


図-3.2.29 安定材の配合と粒径加積通過率の関係（試料E、7日養生）

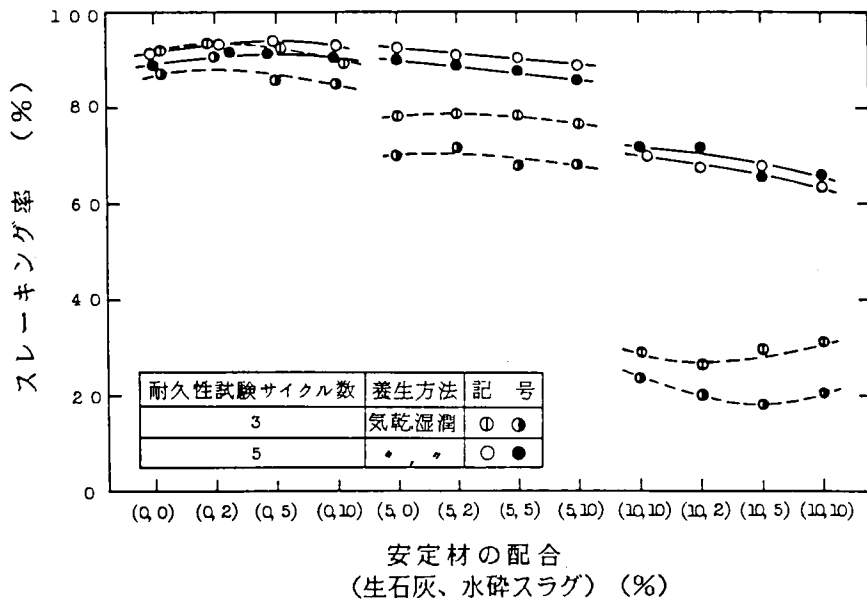


図-3.2.30 安定材の配合とスレーキング率の関係（試料E、56日養生）

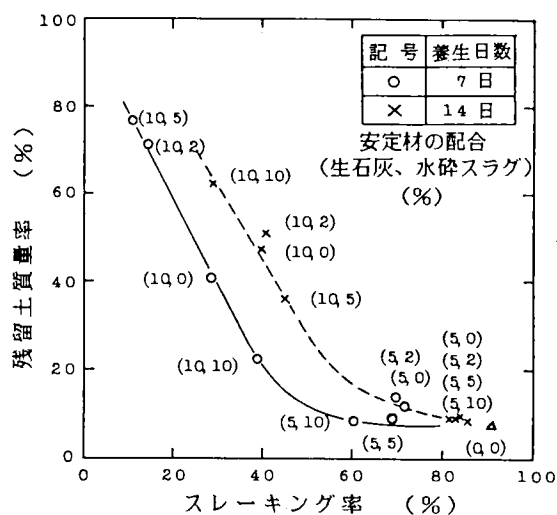


図-3.2.31 残留土質量率とスレーキング率の関係 (試料E、7, 14日養生)

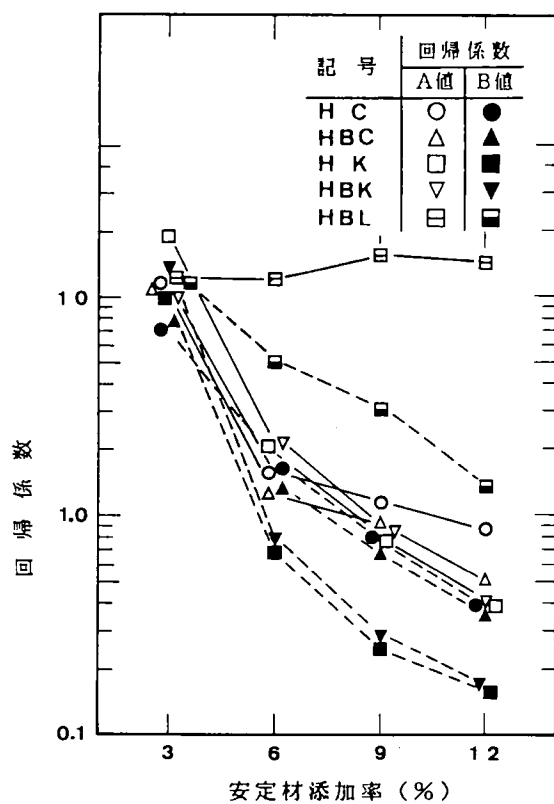


図-3.2.32 安定材添加率と回帰係数の関係 (へどろC、回帰式(5))

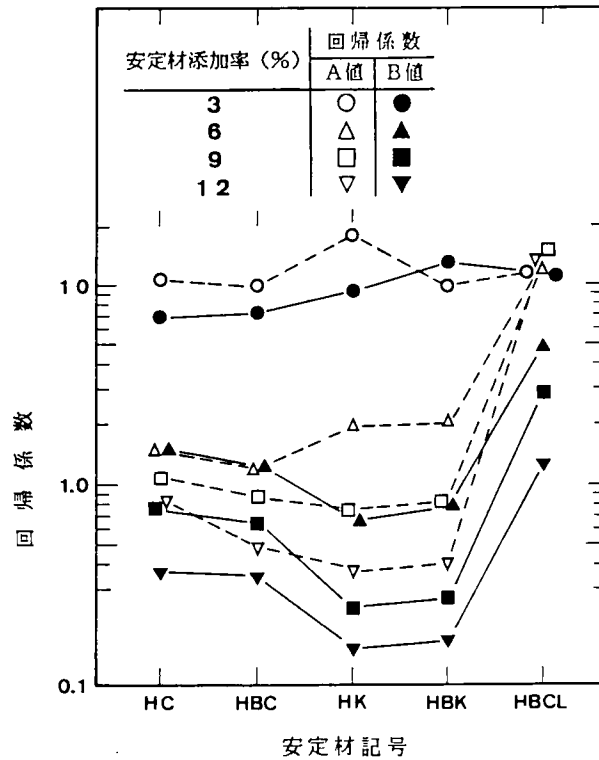


図-3.2.33 安定材の種類と回帰係数の関係 (へどろ C、回帰式(5))

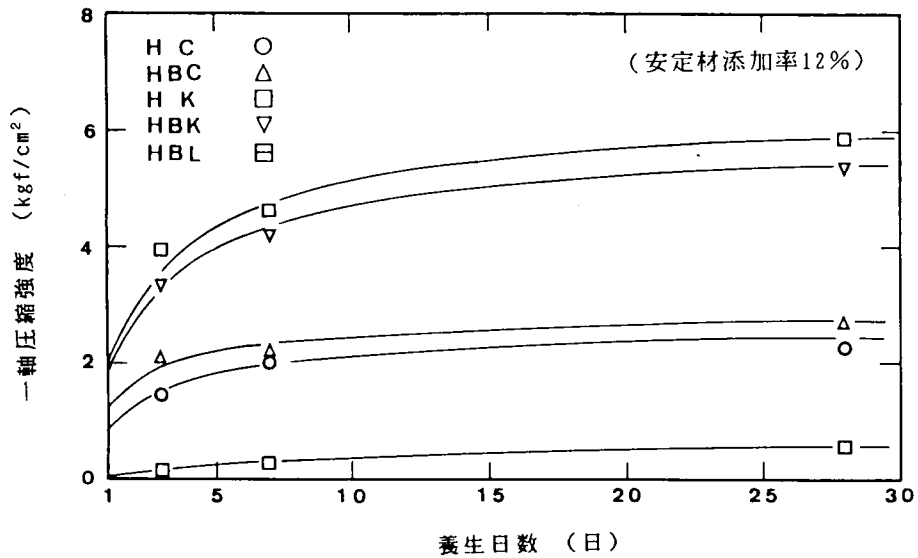


図-3.2.34 養生日数と強度変化 (へどろ C、回帰式(5))

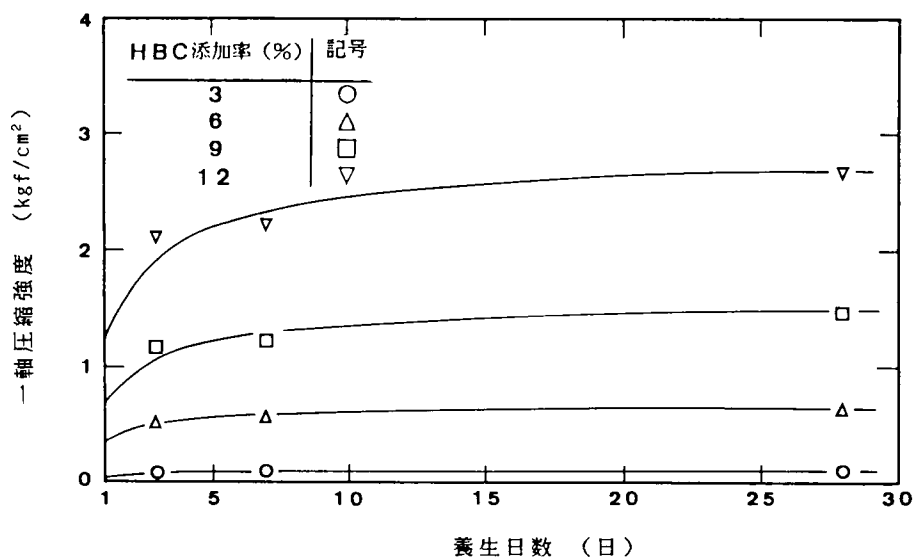


図-3.2.35 養生日数と強度変化 (へどろC、HBC、回帰式(5))

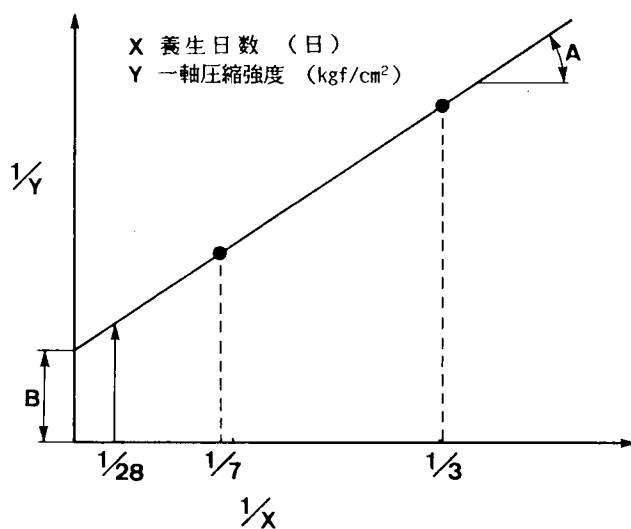


図-3.2.36 回帰式(5)による短期強度から長期強度の推定

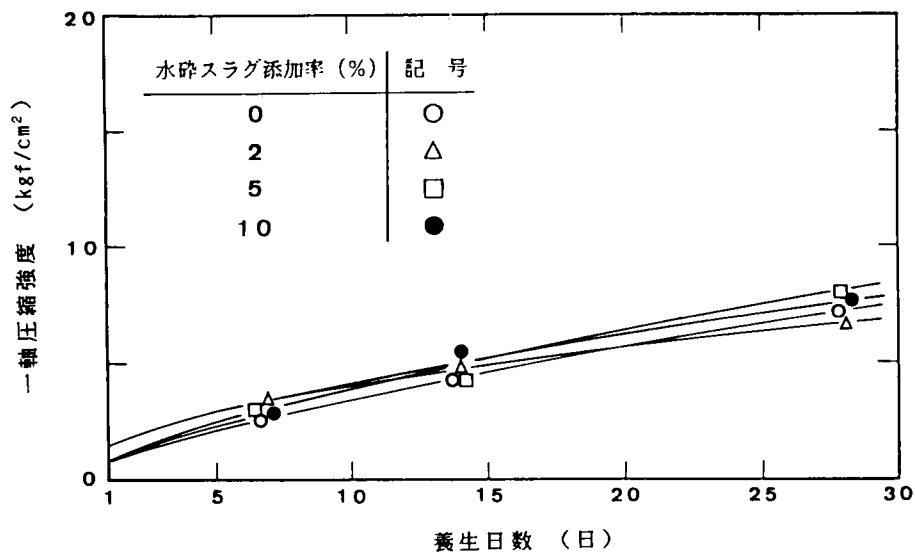


図-3.2.37 養生日数と強度の関係

(試料D、生石灰10%、水砕スラグの粒径0.85mm以下、回帰式(4))

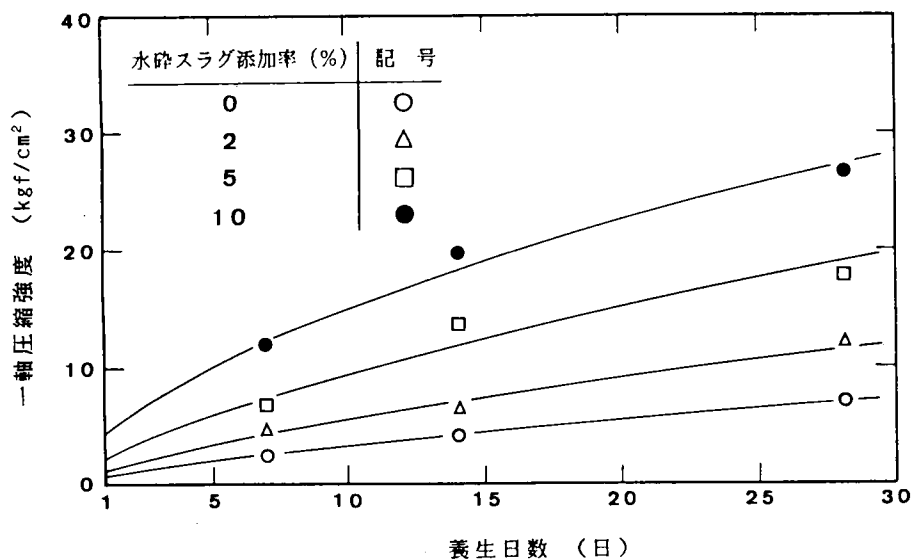


図-3.2.38 養生日数と強度の関係

(試料D、生石灰10%、水砕スラグのブレン値約4000cm<sup>2</sup>/g、回帰式(4))

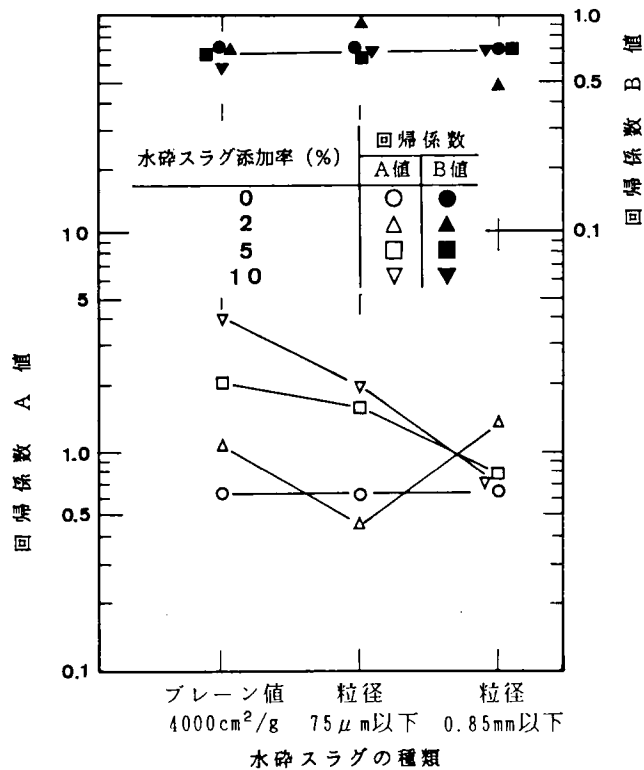


図-3.2.39 水砕スラグの粒徑と回帰係数の関係 (試料D、回帰式(4))

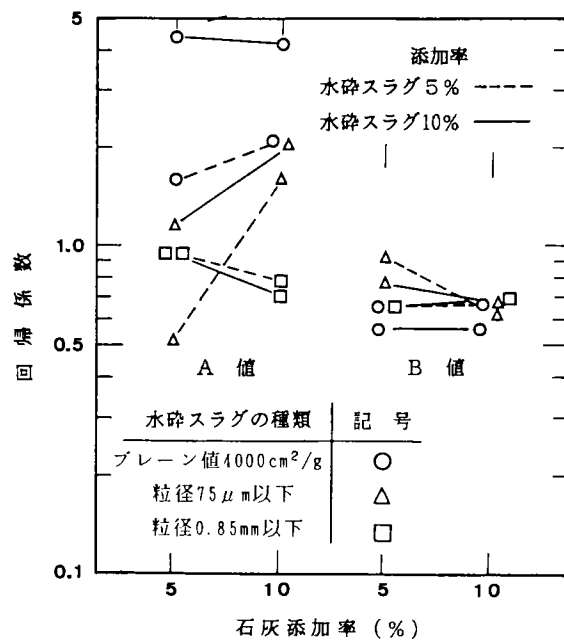


図-3.2.40 石灰添加率と回帰係数の関係 (試料D、回帰式(4))



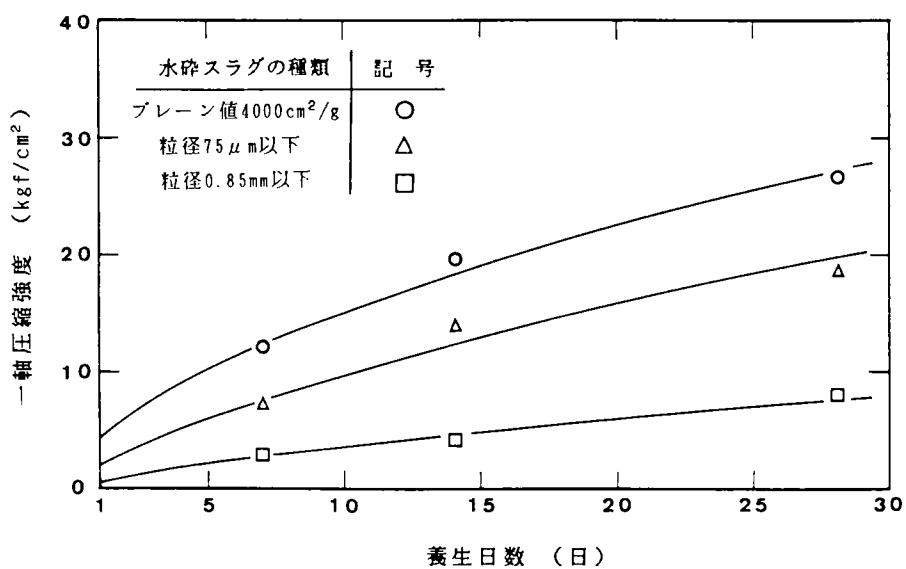


図-3.2.41 水砕スラグの粒径の違いによる強度変化(試料D、回帰式(4))

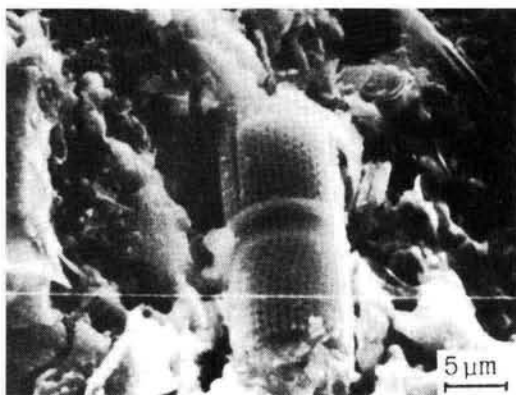


写真-3.2.1 ヘどろCのSEM像

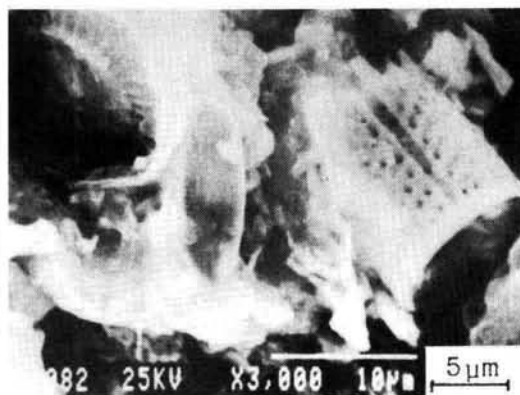


写真-3.2.2 ヘどろCのSEM像

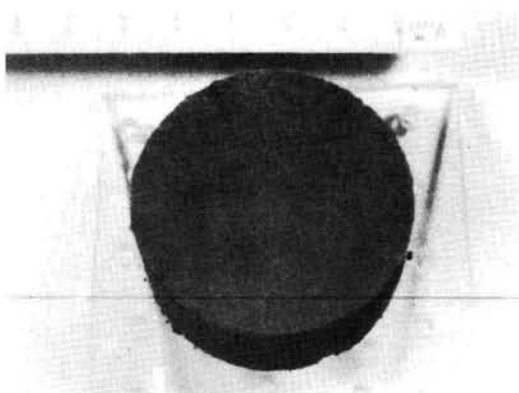


写真-3.2.3 耐久性試験供試体と  
有孔アクリル板

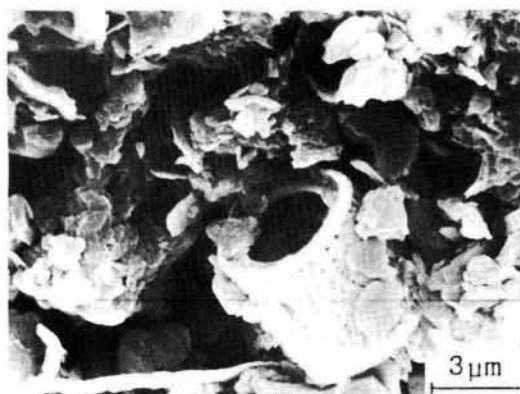


写真-3.2.4 ヘどろB処理土のSEM像  
(HBC添加率3%、28日養生)

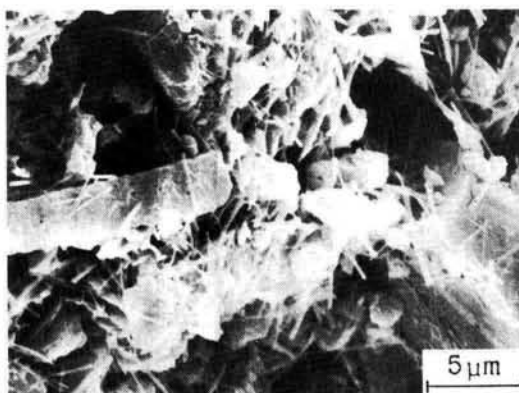


写真-3.2.5 ヘどろA処理土のSEM像  
(HBC添加率12%、3日養生)

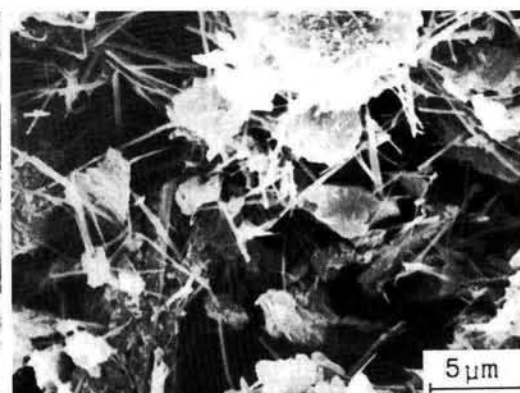


写真-3.2.6 ヘどろB処理土のSEM像  
(HBC添加率12%、7日養生)

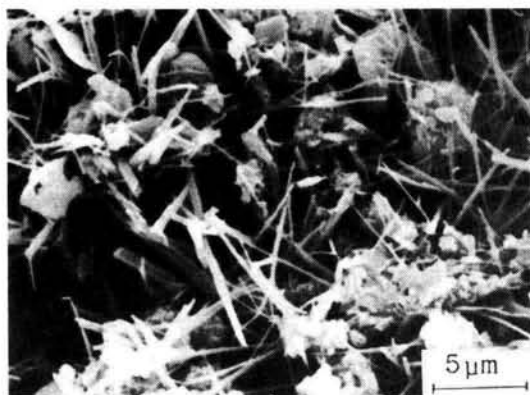


写真-3.2.7 ヘどろA処理土のSEM像  
(HBC添加率12%、28日養生)

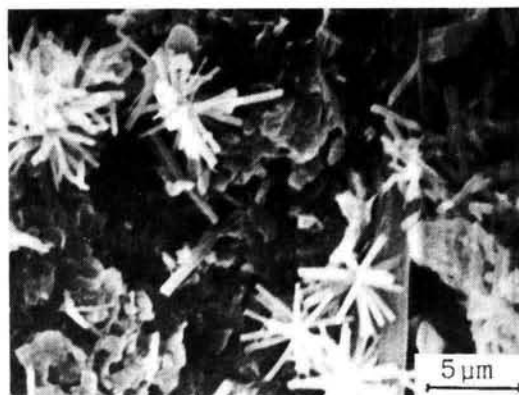


写真-3.2.8 ヘどろB処理土のSEM像  
(HBC添加率12%、3日養生)

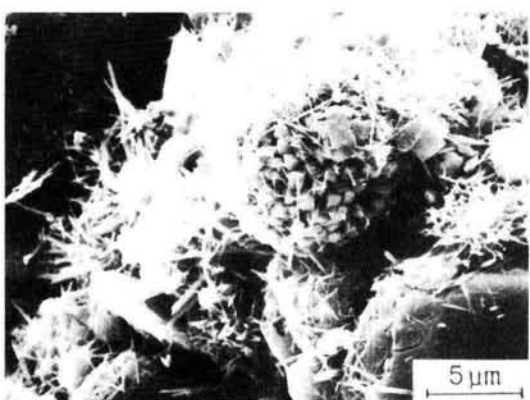


写真-3.2.9 ヘどろA処理土のSEM像  
(HGCS添加率12%、7日養生)

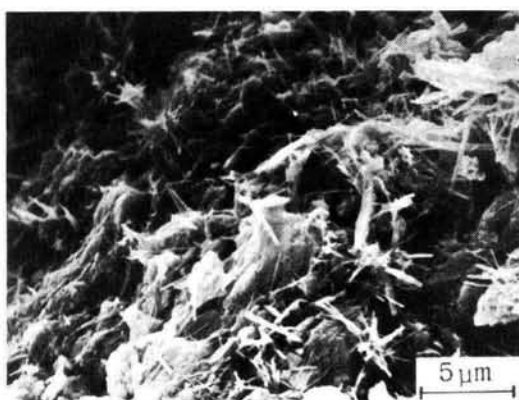


写真-3.2.10 ヘどろB処理土のSEM像  
(HGCS添加率12%、91日養生)

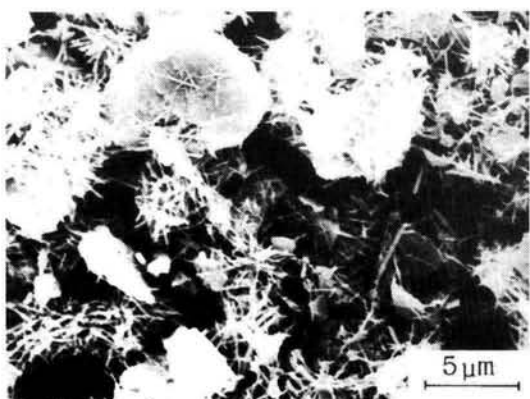


写真-3.2.11 ヘどろA処理土のSEM像  
(HGC添加率12%、3日養生)

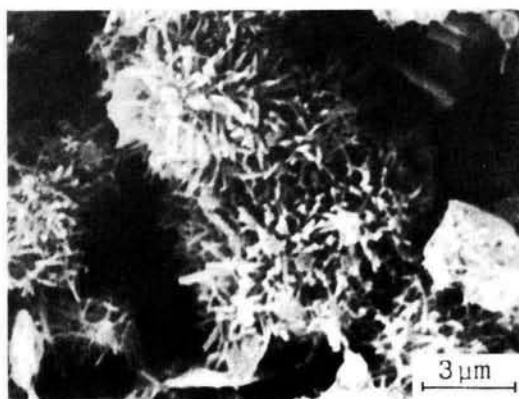


写真-3.2.12 ヘどろB処理土のSEM像  
(HGC添加率12%、7日養生)



写真-3.2.13 ヘどろA処理土のSEM像  
(HBL添加率12%、7日養生)

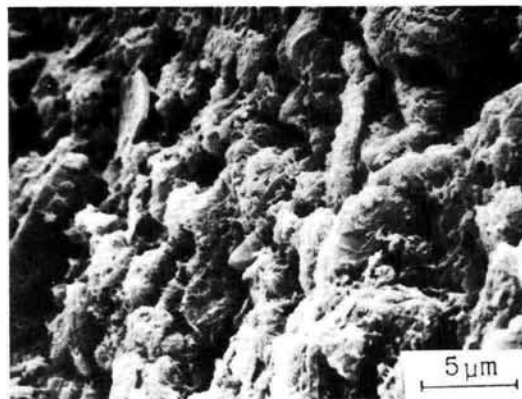


写真-3.2.14 ヘどろB処理土のSEM像  
(HBL添加率12%、7日養生)

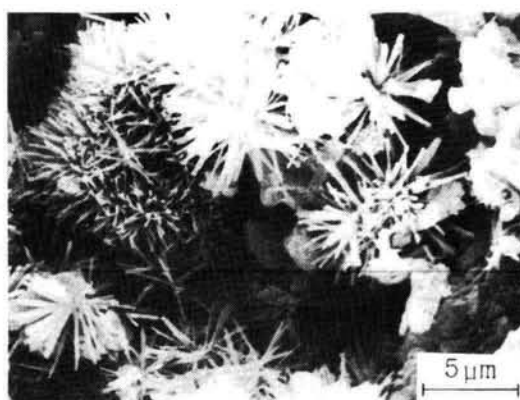


写真-3.2.15 ヘどろB処理土のSEM像  
(HBL添加率12%、3日養生)

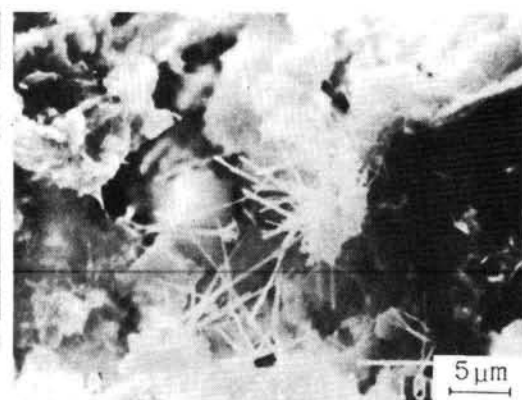


写真-3.2.16 ヘどろC処理土のSEM像  
(HC添加率12%、91日養生)

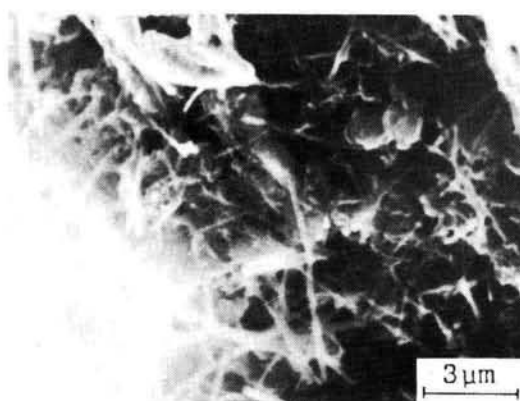


写真-3.2.17 ヘどろC処理土のSEM像  
(HBC添加率12%、28日養生)

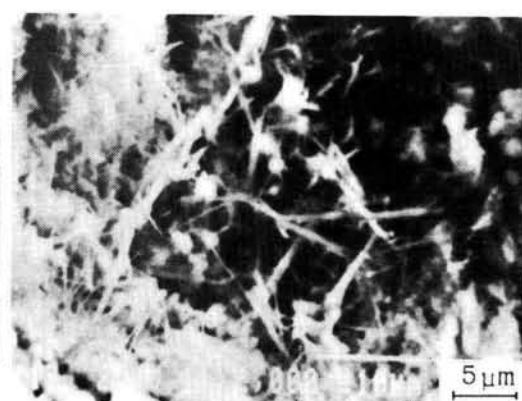
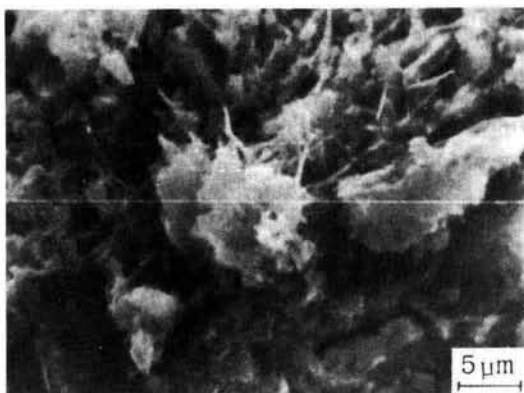
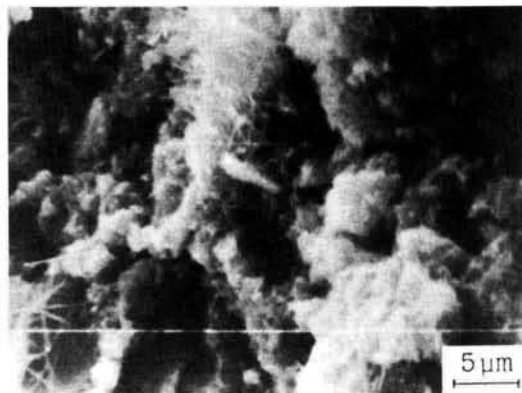


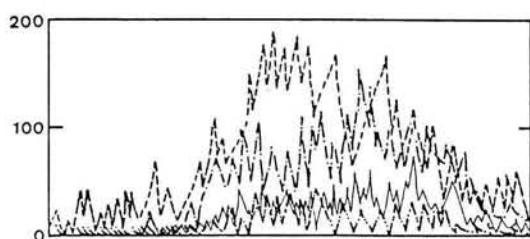
写真-3.2.18 ヘどろC処理土のSEM像  
(HK添加率12%、7日養生)



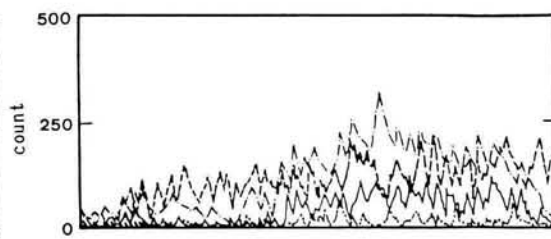
(a) SEM像



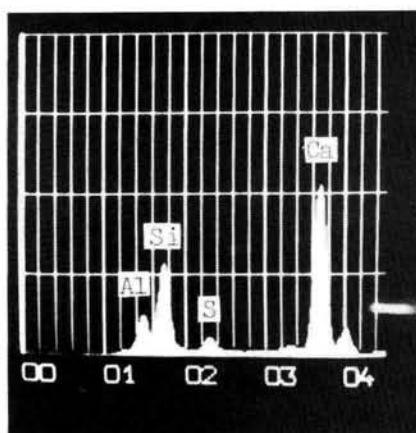
(a) SEM像



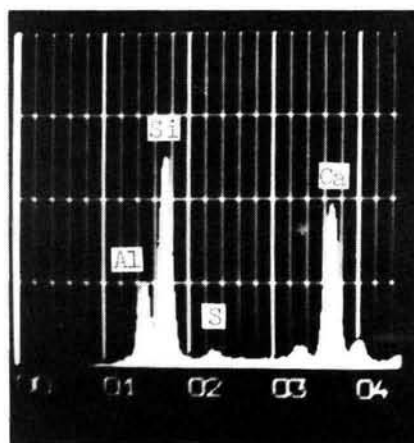
(b) 線分析結果



(b) 線分析結果



(c) 元素分析結果



(c) 元素分析結果

写真-3.2.19 へどろC処理土のSEM-EDXA分析結果  
(HC添加率12%、28日養生)

写真-3.2.20 へどろC処理土のSEM-EDXA分析結果  
(HBC添加率12%、28日養生)

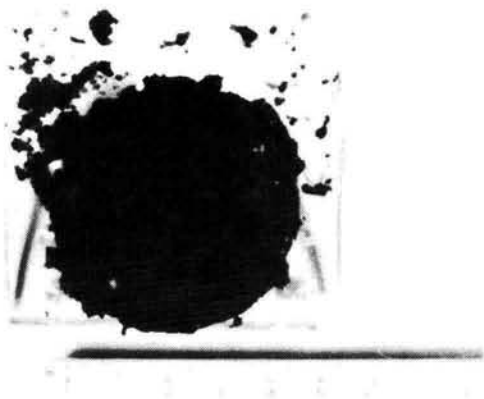


写真-3.2.21 耐久性試験の供試体  
(生石灰10%、水砕スラグ10%、  
1 サイクル後)



写真-3.2.22 耐久性試験の供試体  
(生石灰10%、水砕スラグ10%、  
5 サイクル後)

### 3. 3 火山灰の固化および焼結処理による強度特性と微視的構造に関する研究

#### 3. 3. 1 概 説

現在、世界には約850の活火山があり、そのうちの一部は現在も活発に活動している。これらの火山地域で人々は有機質に富んだ肥沃な耕地により農作物や果実の収穫を得たり、地熱エネルギーの利用や温泉治療および観光など数々の恩恵を受けている。しかし、他方では多くの災害も引き起こし、人々の生活に支障をきたしたことも少なくない。最近では1980年にはアメリカ西部のセントヘレンズ火山が爆発し、噴煙が成層圏にまで舞い上がり世界各地の気象に大きな影響を与えた。また、1985年のコロンビアのネバドデルルイス火山の大噴火では山腹崩壊と雪解け水による大洪水が発生し多くの被害をもたらせた。一方、わが国には77の火山が存在しており<sup>1)</sup>、北海道の有珠火山では1943年以来の活動により標高407mの昭和新山が誕生し、また、1987年には東京都伊豆大島の三原山の噴火では溶岩流のため全島民に避難命令が発令されたことは記憶に新しいことである。

現在わが国で活発に活動している火山としては有珠山、三原山とともに桜島火山があげられる。桜島火山は九州鹿児島県、鹿児島湾の始良カルデラの南に位置し、標高1117mで北岳、中岳、南岳の3つの複合成層火山である。大正の大噴火（1914年）により約30億トンの溶岩が流出し、東側の幅400m、深さ72mの海峡を埋め、大隅半島と陸続きになった。また、昭和の噴火（1946年）では黒神部落が埋没している。1955年からは南岳の山頂噴火により、多量の火山灰や噴石による災害も発生している。そして、現在まで消長を繰り返しながら継続しており、1988年6月、鹿児島市内での24時間の降灰量は観測史上最大の2671g/m<sup>2</sup>を記録して現在もなお活発な噴煙活動を続けている。

火山活動には溶岩の流出と火砕物の放出があり、火口から放出される火砕物は粒径の大きなものから64mm以上の火山岩塊、64～2mmの火山れき、および直径2mm以下の火山灰に分けられる<sup>2)</sup>。

桜島の火山灰の種類は外観により大きく分類して、黒灰色、赤暗灰色、灰白色の3種類のものがあり、それぞれ黒灰、赤灰、白灰と呼ばれている。ここで各火山灰の成因および特徴について述べると、黒灰はこれまで桜島の火山灰と呼ばれてきた代表的なものであり、火山弾や溶岩を微粉碎したものと同一化学組成である。斜長石、輝石および火山ガラスより成り、粒径は300μm以下のもので鋭角に富む不規則形状および丸みのある粒子からできている。これらは火口底で冷却固化しつつあった溶岩が火道内に蓄積されたガス圧によって爆発し、放出されたものである。

赤灰は1968年および1972年に農園芸作物を全滅させ、大きな被害を与えたものであり、黒灰に比べFeOが少なく、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が多いため赤褐色になる。粒径は200  $\mu$ m以下のもので、丸みのある不規則な形状のガラス粒子がきわめて多い。硬石膏、石膏、 $\alpha$ -クリストバル石および非晶質珪酸の存在が特徴である。以上より、赤灰は火口底で火山ガス成分に富み、加熱酸化される環境で変質作用を受け放出されたものと考えられる。

また、白灰は1914年の一度だけに記録されたものであり、鋭角に富む不規則な裂片状や針状の粒子および発泡状の火山ガラスが多く、粒径は100  $\mu$ m以下のもので他の黒灰、赤灰に比べ最も微細な粒子からなっている。黒灰に比べ非晶質珪酸が多い特徴がある。成因は地下のマグマが火口から低温低圧の大気中に急激に放出され、発泡しながら急冷断熱膨張を起こしたものと推定されている<sup>3)</sup>。

火山から放出される火山灰は膨大な量であり、人間生活および経済に大きな影響を与えている。降灰による健康障害、粉塵、泥流災害、降灰の除去、農作物の保護などは火山地域では大きな問題になっている。火山灰は無機質の細かな粒状で保水性に乏しく取り扱いが困難であり農業には適さない。また、傾斜地に堆積した火山灰は降雨の際には泥流や土石流となり、その被害も少なくない<sup>4)</sup>。さらに、工業の分野でも利用価値は低く、処分地の確保にも困難な状態である。しかしながら、火山灰は硬化活性を持った自然のポゾラン材料でありコンクリートなどの分野での利用が考えられている<sup>5)</sup>が、現在では有効に利用されている火山灰は極くわずかであり、粘土と混合した焼き物、ガラス食器や運動施設用の材料として一部が用いられているにすぎない。

本節の目的は鹿児島県、桜島火山の降下火山灰を、石灰・セメント系安定材により固化処理し、建設材料として有効に利用することを目的としている。そこで、安定材の種類、火山灰の粒径や供試体成形時の含水比の違いが強度発現に及ぼす影響について考察している。さらに、安定材を添加して固化成形した火山灰を高温で焼成することにより、高強度材料としての可能性について、特に、安定材の添加量や焼成温度による工学的性質の変化を検討している<sup>6), 7), 8)</sup>。

### 3. 3. 2 材料特性と実験概要

用いた試料は桜島の黒神、持木地区で採取した新生灰を混合したもので、降下灰の代表的な種類の黒灰である。実験には粗大粒子などを除いた5 mm以下のものと、粒径の違いによる固化効果を調べるため、ポットミルで7時間破碎したものと二種類の試料を用いた（写真-3.3.1, 2）。火山灰の化学成分、物理的性質および粒径加積曲線は表-3.3.1, 2、図-3.3.1のと



おりである。これらによると火山灰は粒子が堅固で破碎処理を行うと粒子の稜線が丸くなり、0.2mm径以上の粒子の量の減少がみられるが、その量はわずかであり、あまり破碎した効果はみられない。そして、いずれの試料とも均等粒径の粒度分布の悪い試料である。また、硬化反応に関係深い $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ や $\text{CaO}$ が多く含有されており、ポゾラン活性の高い材料と考えられる。蛍光X線分析、SEM-EDXA分析（写真-3.3.3）およびX線回折（図-3.3.2）の結果、主な構成元素はCa、Fe、Si、Ti、Al、Kであり、結晶鉱物として灰長石が認められた。また、写真-3.3.4は火山灰粒子（写真-3.3.1）の反射電子像である。反射電子は試料の組成、表面の凸凹、結晶性などの情報を持っており、試料構成元素の原子番号が大きくなるに従って反射電子強度が増加する特徴がある<sup>9)</sup>。写真-3.3.4には白く輝く部分が点在しており、造岩鉱物の間に鉄分、石灰や石膏の存在が推定される。

安定材は表-3.3.3に示す普通ポルトランドセメント（記号PC）とセメントと消石灰に、硫酸アルミニウムと炭酸ナトリウム（CAS材）を混合した（記号CG、LG）の3種類である。

供試体は一軸圧縮試験と曲げ強度試験に用いる二種類作製した。一軸圧縮試験の供試体は火山灰の乾燥質量に対し、安定材を5、10、20%の3とおりを添加した後、含水比を最適含水比（約15%）に調節したものは、JIS A 1210の第一方法と同じエネルギーで締固め、含水比が30%のものは空隙ができないように振動を与えて、直径5cm、高さ10cmのモールドに詰めた。養生は樹脂フィルムでラップし、20℃の恒温室にて所定日数行い、一軸圧縮試験を行った。

一方、焼結処理による曲げ強度試験は早期に脱型が可能な安定材のCGとLGを用いた。供試体は安定材混合後の含水比を10%、20%、30%に調整した後、10%のものは締固め、20%と30%のものは振動を与え、へらで均して、幅4cm、長さ16cm、厚さ約1cmの板状に成形した。そして、24時間後脱型し、質量の変化がなくなるまで室内で乾燥した。焼結処理の方法は予備試験を行った結果、火山灰粒子の溶融による供試体の変形が起こらない温度以下であり、焼結の程度が最も異なる1050℃と1080℃に定めた。仮焼を600℃で2時間、本焼は1050℃あるいは1080℃で7時間行った。焼結処理後の供試体は図-3.3.3に示す支点間隔5cmの中央載荷方式による曲げ強度試験、および透水試験などにより工学的性質を追究した。これらの一軸圧縮試験および曲げ強度試験の実験手順は図-3.3.4、5のとおりである。

### 3.3.3 石灰・セメント系安定材を添加した火山灰の強度特性

図-3.3.6は最適含水比（約15%）で締固めた火山灰の養生初期の強度変化を示している。いずれの安定材においても養生の経過および添加率の増加により強度は大きくなっている。石

灰系安定材 L G の強度は小さな値ではあるが、養生の経過に伴う強度増加は少なくない。セメントだけを添加した P C に比べ、C A S 材を含有しているセメント系の C G の強度発現が著しく、特に、養生初期において、その傾向は顕著になっている。固化処理した火山灰（以後、処理灰と呼ぶ）の路盤材への適用について考えてみると、石灰系の L G 5 % の添加では、7 日養生で下層、および上層路盤の 10 日養生の基準値 7、10 kgf/cm<sup>2</sup> を満足している。一方、セメント系安定材の C G やセメントだけの P C では 5 % の添加量で下層路盤の基準値 10 kgf/cm<sup>2</sup> を、また、10 % の添加では上層路盤の 30 kgf/cm<sup>2</sup> を大きく上回っており、強度の面では十分路盤材としての利用が可能である。

図-3.3.7 は安定材添加率が最も少ない 5 % の養生日数と強度の関係である。全ての安定材で長期にわたる強度の増加がみられ、特に、初期強度の低かった P C が長期間の養生で大きな強度増加を示している。これはセメントの水和により生成される石灰と火山灰により長期にわたる硬化反応があったものである。また、強度発現の小さな石灰系安定材の L G でも 91 日後には C G とほぼ同じ強度になっており、安定材としての石灰の有効性と長期にわたる硬化反応性の良さを示している。

供試体成形時の含水比を 30 % に調整し、締固めをしていない供試体の圧縮試験の結果が図-3.3.8 である。この処理灰はフロー値が安定材 L G で 150 ~ 200 mm、C G で 200 ~ 250 mm 程度であり、大変流動性の良いものである。強度増加の傾向は最適含水比で成形したものによく似ており、L G、C G、P C の順に後者ほど、また安定材の添加率が多いほど高い強度になっている。しかし、含水比の増加により養生の経過に伴う強度増加の程度は低く、長期強度は最適含水比で成形したものの約半以下になっている。これらの強度発現の結果はセメント系の固化効果の有効性を示しており、また、C A S 材の配合は養生初期の硬化促進および安定材添加率の低い場合に固化効果が顕著であることがわかる。

次に、火山灰試料の細粒化による固化効果の影響を調べた。未破碎試料に対するポットミルで破碎した火山灰供試体の強度比を図-3.3.9 に示している。図-3.3.9(a) の最適含水比で成形した供試体は養生初期において安定材 L G の強度比が大きく、特に、添加率 5 % の 3 日養生では 5.5 kgf/cm<sup>2</sup> から 14.4 kgf/cm<sup>2</sup> と約 2.6 倍となり、火山灰を破碎した効果がみられる。しかし、安定材 C G の養生初期の強度比は 1.0 より小さくなっており、破碎の効果はみられない。そして、長期の養生ではどちらの安定材でも強度比は 1.0 に近づき、未破碎試料と同程度の強度になっている。一方、図-3.3.9(b) の成形時含水比が 30 % の供試体では安定材 C G の 3 日養生のものを除く全ての場合で、破碎した処理灰は未破碎のものより大きな強度を示しており、特に、安定材 L G では約 1.5 倍の強度になっている。

表-3.3.4 は石灰系安定材を添加した処理灰の、未破碎試料に対する破碎試料供試体の乾燥

密度低下率を示している。ポットミルによる粒子の破碎により火山灰の粒度分布が悪くなり乾燥密度が大きく低下し、特に、締固めを行った最適含水比で成形した供試体の低下率は約10%にもなっている。これらの安定処理灰の乾燥密度の低下にも関わらず養生初期からの破碎試料供試体の強度比の増加は、大きくなった粒子間隙を安定材による硬化反応生成物により埋め、供試体の初期剛性を高めたものであり、粒子破碎がもたらす活性の増加による強度発現性の良さを示している。しかし、安定材CGではセメントの成分が多いため養生初期の強度増加はセメントの水和反応が主であり、供試体中の空隙や火山灰粒子の表面積の増加のため養生初期の強度比が小さくなったものである。しかし、長期養生では火山灰の硬化活性が高いため強度は大きな値になっている。

表-3.3.5は各種安定材で処理した試料のCBRと安定材添加量の関係である。なお、養生方法は3日間20℃の室内で養生した後、4日間水浸を行った。すべての安定材と配合で大きなCBRを示しており、一軸圧縮試験の結果と同様、安定材PCがCG、LGに比べて大きな値となっている。そして、火山灰が5%以下の安定材の添加により良好な道路の路盤材としての利用が可能と考えられる。

### 3.3.4 焼結処理による固化火山灰の工学的性質と建設材料への適用性

図-3.3.10, 11は成形時含水比が30%の板状供試体の安定材添加率と曲げ強度および透水係数の関係を示している。ここで、板状供試体に用いた安定材は成形1日後に脱型するため養生初期で強度が発現するCAS材を配合したLGとCGである。曲げ強度試験の結果を示した図-3.3.10では、無焼結処理試料は安定材添加率が多いほど高い強度を示しているが、焼結した試料では焼結温度に関わらず添加率が多いほど強度は低下しており、安定材の存在が曲げ強度の増加を阻害している。一方、透水係数は焼結温度が1050℃ではいずれの添加率でもほぼ一定の値を示しているが、1080℃では安定材添加率の少ない5%、10%が20%のものに比べて小さな値となっている。

次に、安定材添加率が10%の板状供試体の成形時含水比と曲げ強度、および透水係数の関係を示したものが図-3.3.12, 13である。曲げ強度は一部の例外を除いて高含水比ほど高い曲げ強度を示している。また、透水係数は成形時含水比が多いほど小さくなっており、特に、1080℃で焼結したものはその変化が大きくなっている。そして、これらの関係は石灰系安定材とセメント系安定材は、ともによく似た傾向を示している。

図-3.3.14, 16は安定材添加率と成形時含水比に対する乾燥密度の関係である。また、図-3.3.15, 17は供試体の線収縮係数との関係を示している。ここで線収縮係数は供試体の脱型時

から透水や曲げ強度試験を行うまでの間に焼結処理や乾燥による供試体の長さ変化の百分率である。これらによると、焼結した供試体はC GとL Gのいずれの安定材でも添加率の増加により線収縮係数と乾燥密度が小さくなる傾向を示している。その結果、透水係数が大きくなり、曲げ強度が小さくなったものである。一方、成形時含水比との関係では含水比が大きくなると線収縮係数が大きくなり、乾燥密度、曲げ強度が増大し、透水係数が小さくなることがわかる。

また、焼結温度による違いを見ると、高い1080℃で処理した供試体は1050℃のものに比べ、線収縮係数、乾燥密度、曲げ強度が大きくなり、透水係数が小さくなっており、焼結温度による火山灰粒子のガラス化の程度の違いを表わしている。

以上の結果、JISに定められているセメントがわら<sup>10)</sup>や厚形スレート<sup>11)</sup>、およびボード類の破壊曲げ荷重は応力度に換算すると約100～150kgf/cm<sup>2</sup>程度であることから、強度の面から考え、また不燃性などの特徴と合わせ、火山灰は焼結処理を施すことによりボード材料への利用が考えられる。また、透水性の良さを利用した公園や緑地の舗装材料や擁壁などのブロック材料として土木建築材料への適用が可能となった。

### 3. 3. 5 固化および焼結処理による火山灰の反応生成物と微視的構造

#### (1) 固化処理した供試体の反応生成物と微視的構造

固化処理した供試体の反応生成物と微視的構造の観察は固化効果の高い最適含水比で成形した供試体で行った。

図-3.3.18, 19は高強度が得られ、硬化反応が顕著である破碎火山灰の安定材添加率が20%、最適含水比で成形した供試体の養生日数と反応生成物のX線回折強度の関係である。石灰およびセメント系のいずれの安定材でも養生初期にエトリンガイトが生成していることがわかる。そして、その生成量は養生の経過に従い漸減している。消石灰の回折強度では含有量の多い石灰系L Gでも養生の経過とともに減少し、28日以後には大部分が消失している。さらに、炭酸カルシウムもC A S材による炭酸化のために養生初期に多く生成されており、長期養生では減少している。一方、図-3.3.19のセメント系安定材でもほぼ同様の傾向を示しており、Ca成分がX線回折では検出できない非晶質の硬化反応生成物に消費されたものと考えられる。

写真-3.3.5, 6は未破碎の火山灰に石灰系安定材を5%添加し、最適含水比で成形したものである。3日の養生初期から針状の反応物が粒子の表面を覆い粒子間を埋めていることがわかる。また、写真-3.3.6には板状の反応生成物が多数見られる。SEM-EDXA分析の結果によると、針状生成物はS成分が特に多く、Ca、Al成分の存在によりエトリンガイトであるこ

とがわかる（写真－3.3.7, 8）。火山灰粒子の表面には火山より噴出する際、火山ガス成分の水に可溶の $\text{SO}_4^{2-}$ が付着しており<sup>12)</sup>、安定材中のS成分とともにエトリンサイト生成反応に貢献したものと考えられる。また、写真－3.3.9の板状の生成物はAl成分に対してSのピークが小さいことよりCaが多く存在し、Sの量が少ないときに生成されると言われているモノサルフェートやC A H系反応生成物と考えられる。

写真－3.3.10, 11, 12は破碎した火山灰に石灰系安定材を10%添加した処理灰である。3日養生の写真－3.3.10では火山灰粒子表面を覆っている石灰成分とともに棒状に成長したエトリンサイトがみられ、硬化反応が顕著であることを示している。そして、7日養生以後ではエトリンサイトの間隙を板状や小さな粒状の生成物が埋め、表面は滑らかなものになっている。そして、セメント系安定材でも長期養生供試体の表面は滑らかになり、石灰系安定材とほぼ同様の傾向になっており（写真－3.3.13, 14, 15）、安定材添加率の多い処理灰ほどその傾向は顕著になっている（写真－3.3.16）。表－3.3.6は火山灰の可溶性の反応性元素の溶出試験の結果である。特にアルカリ雰囲気でのAl成分の溶出量の多いことがわかる。この可溶性のAlおよびSi成分と安定材L Gやセメントの水和にて生成される石灰分との反応によってC A HやC S H系反応生成物が長期にわたり生成したものと考えられる。そして、これらの反応物は非晶質や結晶性が低いためX線回折では検出できず、エトリンサイトや $\text{CaCO}_3$ のピークが小さくなったものである。

また、全般的にみて未破碎の火山灰に比べ破碎したものの方が硬化反応性の良い観察結果が得られ、粒子破碎による強度比の増加結果を裏づけている。

## （2） 焼結処理供試体の微視的構造

焼結処理供試体の微視的構造の観察は最も硬化反応の進んでいる成形時含水比が30%のもので行った。

写真－3.3.17, 18は未焼結処理の板状供試体である。火山灰粒子の間隙を硬化反応生成物が埋めて一体化し、緻密な構造体を形成している。

次に、焼結処理を行ったセメント系安定材供試体の写真を写真－3.3.19～22に、また、石灰系安定材によるものを写真－3.3.23～26に示す。セメント系安定材の1080℃で焼結処理した供試体では、5%の安定材添加率のものは試料全体が均質なガラス質となっており、火山灰粒子の原形は全く見られない。そして、独立した球形の気泡が点在している（写真－3.3.19）。また、添加率が20%のものはガラス化した断面に小さな粒状のものが溶けずに残留しており、空隙も不定形のものがみられる（写真－3.3.20）。一方、1050℃で焼結した安定材添加率が5%のものは、溶解した火山灰粒子の間に安定材や反応生成物が残留しているのが確認でき、その

回りには不定形の大きな空隙がみられる（写真－3.3.21）。そして、安定材添加率が20％に増加すると、不溶解部分は大変大きな容積になっている（写真－3.3.22）。これは焼結処理により融解点が火山灰より高い安定材や硬化反応物が供試体中にそのままの形で残っており、安定材などの存在が焼結処理供試体の強度増加を阻害しているためである。これらの安定材添加率と焼結処理温度による火山灰のガラス化との関係は石灰系安定材を添加した供試体はセメント系安定材のものと全く同じ傾向を示している（写真－3.3.23～26）。

以上の結果、焼結処理を行った供試体では安定材添加率の多い供試体ほど未溶解部の空隙が多くなり、曲げ強度が小さくなり、透水係数が大きくなったものである。また、高い焼結温度処理では空隙は独立した球状になり透水係数が大変小さくなったことがわかる。

### 3. 3. 6 石灰・セメント系安定材による火山灰の強度発現の定式化と最適処理条件の推定

表－3.3.7は各種の安定材の配合および添加率について1、3、7、28、91日の強度試験の結果を養生日数（X）と強度（Y）の関係について回帰分析を行ったものである。なお、回帰式は2章2. 2に示した5種類の式をあてはめている。これによると複数の回帰式の相関係数が0.9以上になっているが、安定材相互の強度発現の比較のため相関係数の高い共通の式を選ぶと、成形時含水比の違いにより二つに分けられる。最適含水比（約15％）で締固めた供試体の強度発現は(4)、(5)の回帰式が良く合っており、一方、含水比が30％の締固めを行っていない供試体の強度発現は式(4)、式(2)の適合性がよい。この原因は最適含水比で締固めた供試体は密度が高く、処理灰粒子が接近しているため、養生初期の硬化反応生成物により高い強度が得られ、それに比べると長期強度の増加が比較的小さいため式(5)の相関係数が高くなったものである。一方、含水比が30％の供試体では処理灰の粒子間隙が大きく、養生初期の強度増加は大きなものではなく、養生の経過により生成される硬化反応物が徐々に処理灰の粒子間隙を埋め長期にわたり強度が発現されるため式(4)、(2)の適合性がよくなったものである。また、安定材の種類による回帰式の違いはみられない。これらの結果、以後、安定処理した火山灰の強度の検討は次の式(4)で行う。

$$Y = A X^B \quad (4)$$

ここで、Y : 一軸圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

X : 養生日数 (日)

A、B : 回帰係数

図－3.3.20、21は最適含水比で締固めた供試体の式(4)の回帰係数を示している。また、図－3.3.22、23は締固めを行っていない成形時含水比が30％のものである。全体的に安定材添加

率や添加量に対する回帰係数 B 値の変化は少ないが A 値の変化は大きなものになっている。

成形時含水比が30%の処理灰をみると、当然ながら安定材添加率の増加にともない回帰係数 A 値は増加し、すべての安定材で強度が大きくなったことを示している。そして、セメントだけの P C が C A S 材を添加した C G、L G に比べ特に大きな値になっている。一方、係数 B は若干の差ではあるが C A S 材配合量の多い L G、C G、P C の順に前者ほど大きな値になっている。さらに、強度の小さな安定材添加量の少ないものが大きな値になっており、養生初期の強度に対し、長期にわたる強度発現の割合が大きなことを示している。これらの結果、A 値の値の影響により、成形時含水比と安定材添加率に関わらずセメントだけを添加した P C の強度が大きくなっている（図-3.3.24）。また、L G と C G を比べると、図-3.3.25 に示した安定材添加率が5%で成形時含水比が30%のときに限り L G の強度が C G の強度を上回っている。L G は C A S 材を添加しているものの、安定材の中で最も石灰分の多いものであり、この長期強度の増加は火山灰がボゾラン材料としての硬化活性の高いことを裏づけている。

一方、最適含水比で成形した処理灰では（図-3.3.20, 21）、回帰係数 A 値の値は成形時含水比が30%のものに比べ、特に大きくなり、養生初期から長期にかけての固化効果が大きくなったことを示している。しかし、石灰分の多い安定材 L G では添加率が10%から20%にかけて強度の低下がみられ、添加量の増加が必ずしも強度の増加につながらずに最適な添加量があるようである。また、係数 B は安定材添加率の違いによる変化はほとんどみられない。そして、成形時含水比が30%のものに比べると B 値は全体的に小さくなっているが、A 値の増加により強度は大きな値を示している。

図-3.3.26 は最適含水比で成形した供試体の養生日数と強度の関係を回帰式(4)で示したものである。比較的精度よく実験結果を表していると考えられるが、式(4)を用いた推定値の傾向として養生初期の強度は小さくなり、長期養生の強度は大きくなることからその取扱いや適用範囲などに留意する必要がある。

以上の結果、降下火山灰は硬化速度の速いセメントを用い、締固めた処理土においても長期にわたる強度増加がみられ、式(5)とともに式(4)の適合することがわかった。これは火山灰が粗粒で均等粒径の試料であるため空隙が多いことと、反応性元素の溶出試験の結果より硬化活性の高い材料であるためである。一方、締固めない処理土も式(4)の適合性の良いことがわかった。

### 3. 3. 7 本節のまとめ

火山から放出される降下火山灰は膨大な量であり、経済や社会環境に大きな影響を与えている。これらの火山灰は細粒で保水性が小さく農業や工業の分野でも利用価値が低く、その処理や処分は大きな問題となっている。

本節では石灰・セメント系安定材により固化処理し、また焼結処理を施して降下火山灰の有効利用の可能性について検討した。

得られた結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 降下火山灰は可溶性のAl、Si、S成分を多く含有しており、硬化活性の高い良好なポゾラン材料である。
- (2) 固化安定材は低添加率の場合および養生初期の強度増加では硫酸アルミニウムと炭酸ナトリウム（CAS材）を混合したセメント系および石灰系安定材が有効である。しかし、高添加率および長期強度の発現はセメント単独の効果が大きい。
- (3) 火山灰試料の破碎は活性を高め硬化反応を促進するが、強度は供試体の乾燥密度などに大きく影響される。
- (4) 固化処理灰の成形時含水比の増加はフロー値が大きくなり、施工方法の選択の幅を広くするが、強度の発現は最適含水比で成形したものに比べ半分以下の値になる。
- (5) 最適含水比（約15％）で締固めた供試体は密度が高く、処理灰粒子が接近しているため、養生初期の硬化反応生成物により高い強度が得られ、

$$Y = \frac{X}{A + B X} \quad (5)$$

の双曲線回帰式が良く合う。しかし、火山灰の硬化活性の高さより式(4)の適合性もよい。

一方、締固めを行っていない供試体は粒子間隙が大きく養生初期の強度増加は小さい。しかし、養生の経過により生成される硬化物が徐々に処理灰の粒子間隙を埋め長期にわたり強度が発現されるため次の放物線回帰式の適合性がよい。

$$Y = A X^B \quad (4)$$

- (6) 降下火山灰は石灰・セメント系安定材による固化処理により、5％程度の添加で下層路盤に、また、10％の添加により上層路盤に使用することが可能である。一方、焼結処理を行うと、安定材添加量や成形時含水比および焼結温度の操作により、ポーラスな切削の容易なものから透水性のない高強度まで幅広い品質の材料が得られ、ブロックなどの土木材料やボード材、タイルなどの建築構造・化粧材料、および美術陶芸材料としての利用の可能性が考えられる。



## 参 考 文 献

- 1) (社)全国治水砂防協会：日本の活火山砂防、建設省河川局砂防部、1988.
- 2) 福山博之、小野晃司：桜島火山地質図、地質調査所、1981.
- 3) 大場 昇他：桜島火山の黒灰・赤灰・白灰の性状と成因、鹿児島大学理学部紀要（地学・生物学）、No.13, pp.11~27, 1980.
- 4) 長谷川辰巳、花岡正明：活火山桜島と土石流災害、土木施工、山海堂、Vol.27, No.8, pp.91~96, 1986.
- 5) Kaku, T.、Sano, S. and Hori, S. : Application of Volcanic Ash to Concrete, Proc. of Kagosima International Conf. on Volcanos , pp.786~789, 1988.
- 6) 嘉門雅史、澤孝平、友久誠司：桜島降下火山灰の石灰・セメント系固化による有効利用、第23回土質工学研究発表会概要集、pp.2253~2254, 1988.
- 7) Kamon, M and Tomohisa, S : Reuse of Volcanic Ash Erupted from Sakurajima Volcano by the Cement-Lime Hardening, Proc. of Kagosima International Conf. on Volcanos, pp.794~797, 1988.
- 8) 嘉門雅史、澤孝平、友久誠司：桜島降下火山灰の石灰セメント系固化と焼結処理による有効利用、第43回土木学会年次学術講演会概要集第3部、pp.164~165, 1988.
- 9) 日本電子顕微鏡学会、関東支部：走査電子顕微鏡の基礎と応用、共立出版、pp.445~446, 1983.
- 10) 日本規格協会：セメントがわら、JIS A5401, 1978.
- 11) 日本規格協会：厚形スレート、JIS A5402, 1981.
- 12) Oba, N.、Tomita, K. and Yamamoto : Vesiculation and Calcium Hydrosulfate Crystals in Volcanic Ashes from Sakurajima Volcano , Japan , and Their Environmental Effects , Proc. of Kagosima International Conf. on Volcanos, pp.678~681, 1988.

表－3.3.1 火山灰の化学成分 (％)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
60.4	15.6	7.31	6.32	3.13	4.82	1.38	0.76

表－3.3.2 火山灰の物理的性質

粒子の破碎処理	未破碎	破 碎
比 重	2.63	
強熱減量 (％)	0.07	
液性限界 (％)	N. P.	
塑性限界 (％)	N. P.	
砂 分 (75 $\mu$ m以上) (％)	69.7	60.7
シルト, 粘土分 (75 $\mu$ m以下) (％)	30.3	39.3
D <sub>60</sub> (m m)	0.23	0.15
D <sub>30</sub> (m m)	0.065	0.059
D <sub>10</sub> (m m)	0.042	0.038
均等係数 U <sub>c</sub>	5.5	3.9
曲率係数 U <sub>c</sub> '	0.44	0.61

表－3.3.3 安定材の配合と供試体の成形時含水比

安定材の 記号	混 合 比 (％)				成形時含水比 (％)
	セメント	消石灰	硫酸アルミニウム	炭酸ナトリウム	
P C	1 0 0	—	—	—	最適含水比, 3 0 (約 1 5)
C G	4 0	2 7	2 7	6	
L G	—	7 0	1 8	1 2	

表－3.3.4 供試体の乾燥密度の比較（石灰系安定材）

成形時含水比 (%)	添加量 (%)	乾燥密度 (g/cm³)		破碎試料供試体の 乾燥密度低下率 (%)
		未破碎試料	破碎試料	
最適含水比 (15)	5	1.807	1.686	6.70
	10	1.742	1.562	10.33
	20	1.622	1.455	10.30
30	5	1.575	—	—
	10	1.505	1.448	3.79
	20	1.431	1.436	-0.35

表－3.3.5 安定材添加率と C B R

安定材の種類	安定材添加率	
	5 %	10 %
L G	66	86
C G	131	204
P C	206	361

表－3.3.6 火山灰の溶出試験結果

溶出元素	C a	A l	S i	S
加水直後	3.2	0.81	4.4	6.0
加水, 7日後	3.3	0.67	3.9	5.1
加水(pH12), 7日後	—	4.2	1.5	6.0

表-3.3.7 安定処理した火山灰と適合回帰式

配合記号	安定材添加率 (%)	成形時含水比 (%)	適合回帰式番号 (相関係数0.9以上)	回帰係数 ((4)式)	
				A 値	B 値
P C	5 1 0 2 0	最適含水比 (15)	1, 4 2, 5, 4, 1 2, 5, 4, 1	3.187 6.083 28.036	0.681 0.699 0.492
	5 1 0 2 0	3 0	1, 4, 3, 2 5, 4, 2, 1 5, 2, 4, 1	1.134 4.635 16.377	0.698 0.457 0.474
C G	5 1 0 2 0	最適含水比 (15)	4, 2, 5 5, 4, 1, 2 5, 4, 2, 1	9.338 17.612 19.068	0.351 0.322 0.353
	5 1 0 2 0	3 0	2, 4, 1 4, 2, 1, 5 5, 2, 4, 1	0.209 1.048 5.583	0.871 0.859 0.617
L G	5 1 0 2 0	最適含水比 (15)	4, 5, 2, 1 5, 4, 2 4, 5, 2, 1	2.958 4.511 3.829	0.642 0.595 0.568
	5 1 0 2 0	3 0	1, 4, 2, 3 4, 1, 2, 3 1, 4, 2, 3	0.114 0.308 0.557	1.087 1.034 0.897

注) 回帰式番号

(1)  $Y = A + B X$

(2)  $Y = A + B \cdot \log X$

(3)  $Y = A \cdot 10^{Bx}$

(4)  $Y = A X^B$

(5)  $Y = \frac{X}{A + B X}$

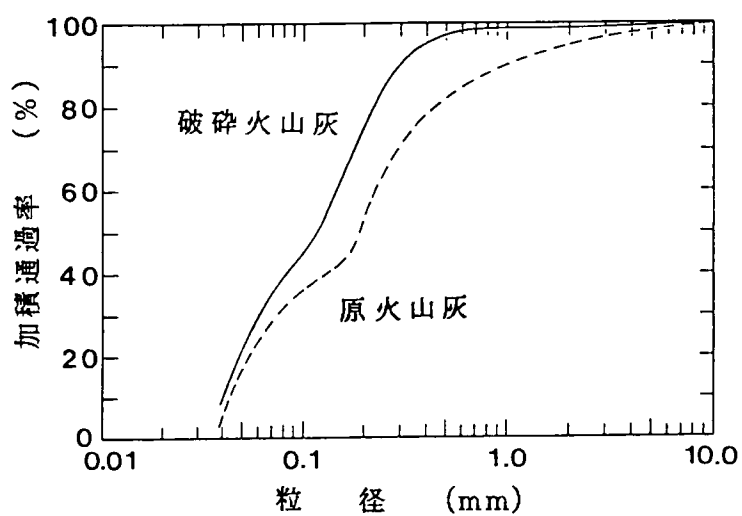


図-3.3.1 火山灰の粒径加積曲線

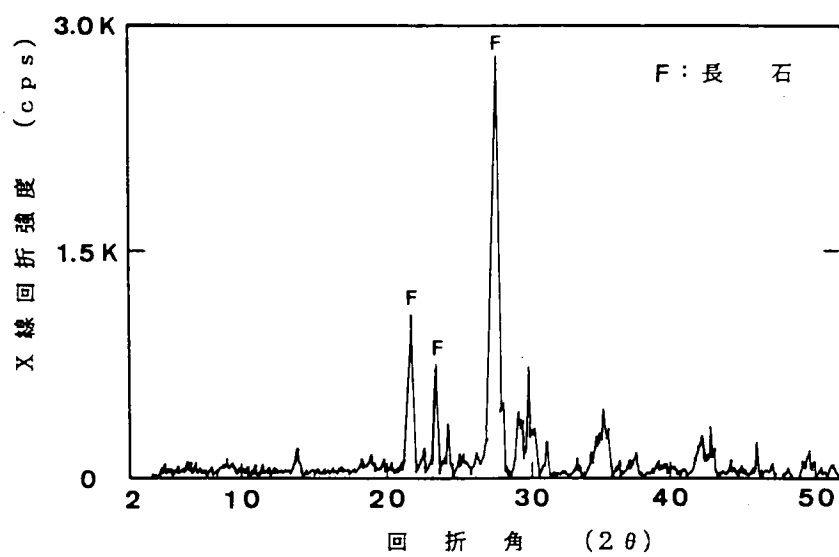


図-3.3.2 火山灰のX線回折結果

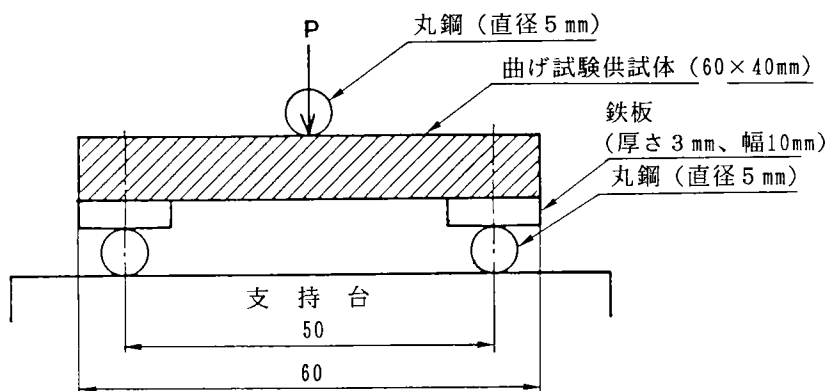


図-3.3.3 曲げ強度試験装置の概要

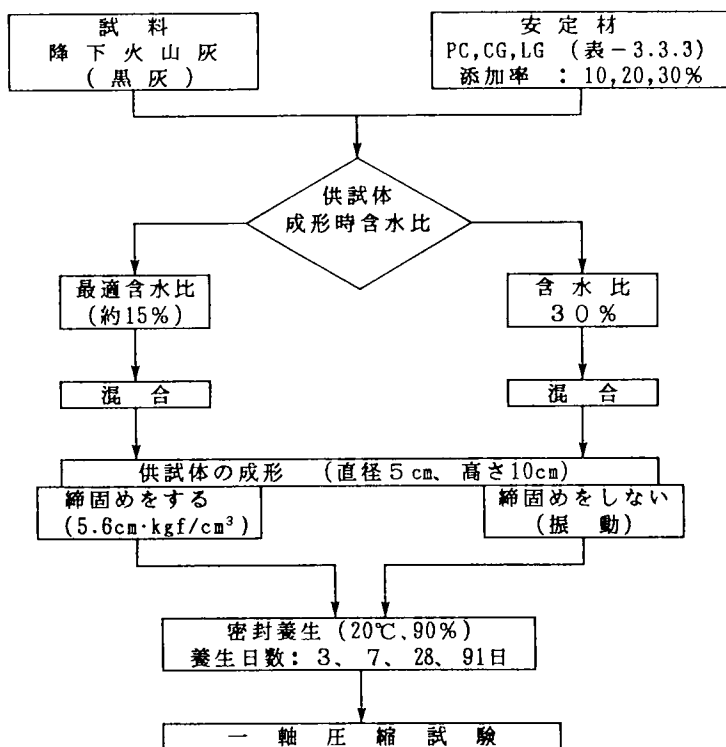


図-3.3.4 一軸圧縮試験の実験手順

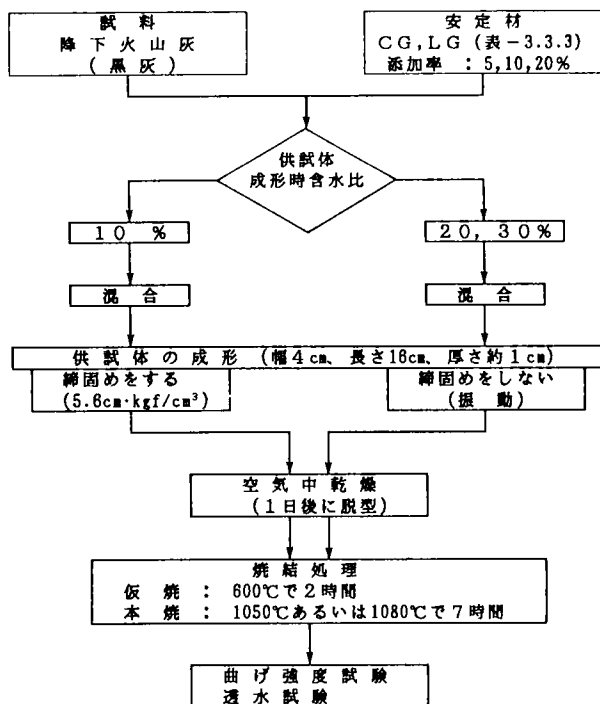


図-3.3.5 曲げ強度試験の実験手順

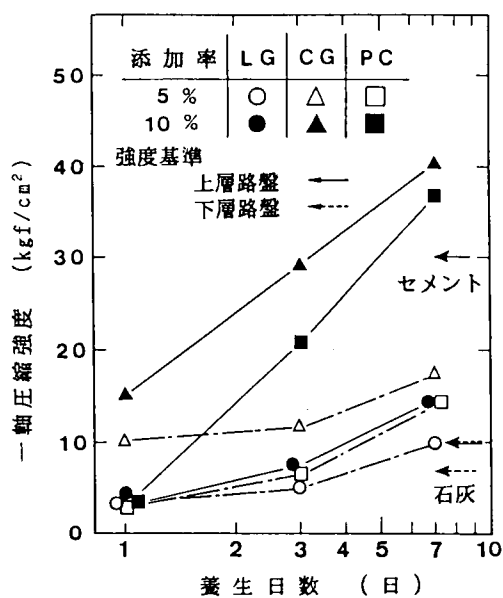


図-3.3.6 養生初期の一軸圧縮強度の変化

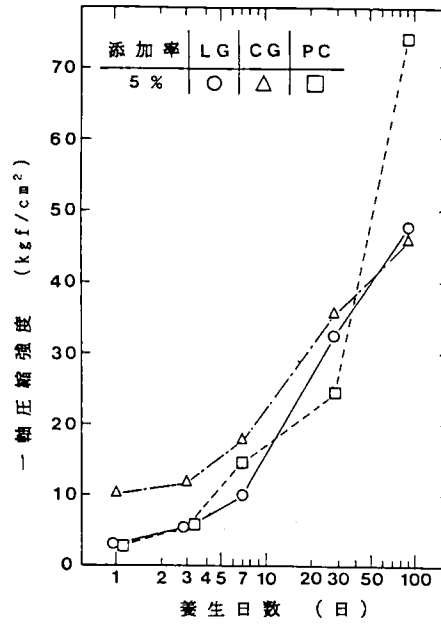


図-3.3.7 養生日数と一軸圧縮強度の関係 (安定材添加率5%)

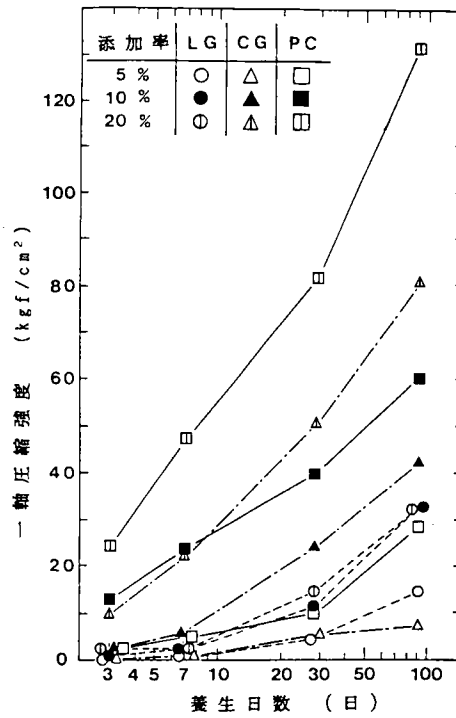


図-3.3.8 養生日数と一軸圧縮強度の関係 (含水比30%)



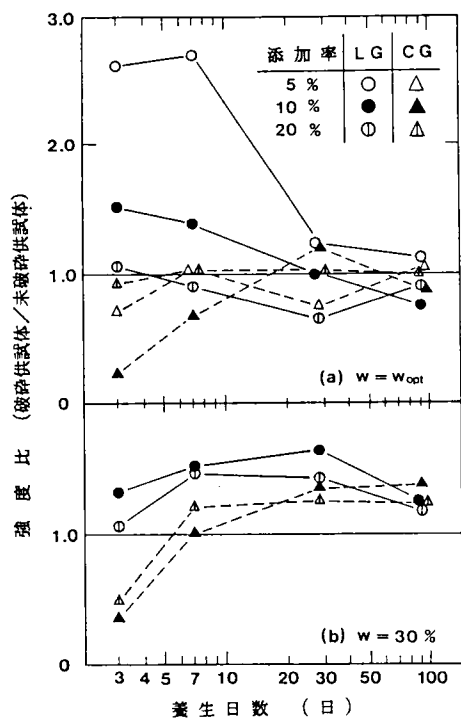


図-3.3.9 未破碎試料に対する破碎試料供試体の強度比

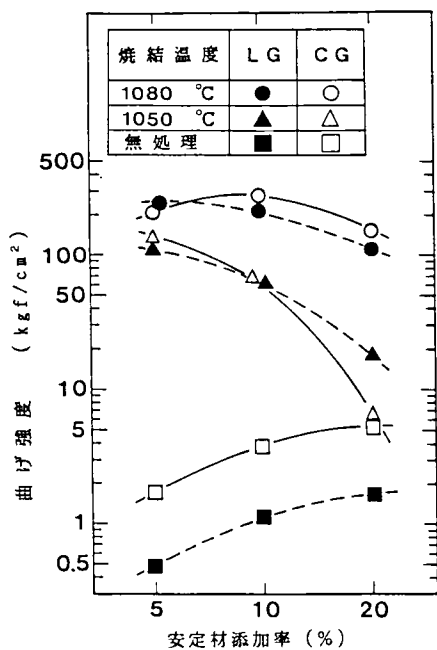


図-3.3.10 安定材添加率と曲げ強度の関係（含水比30%）

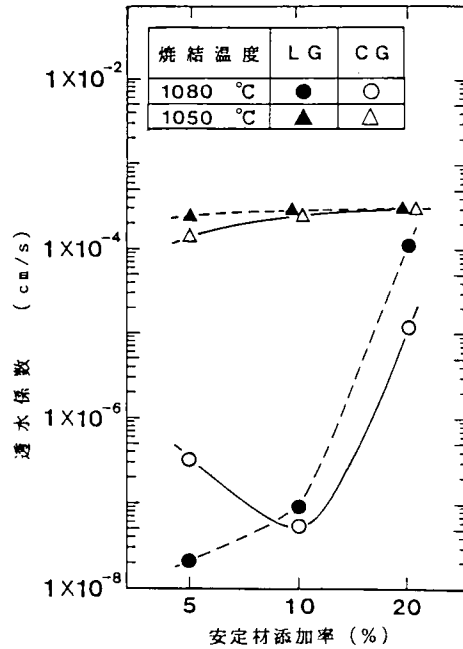


図-3.3.11 安定材添加率と透水係数の関係 (含水比30%)

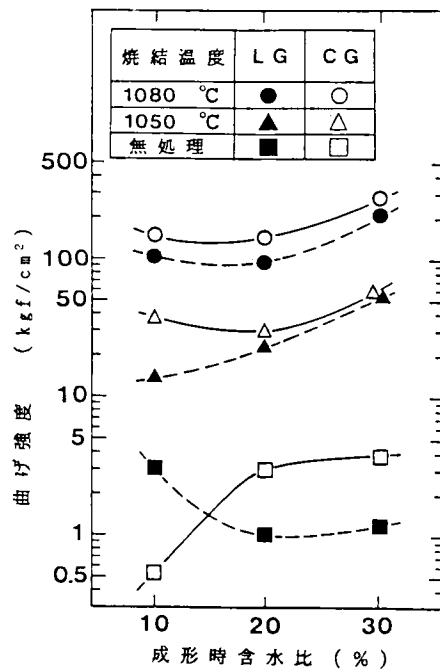


図-3.3.12 成形時含水比と曲げ強度の関係 (安定材添加率10%)

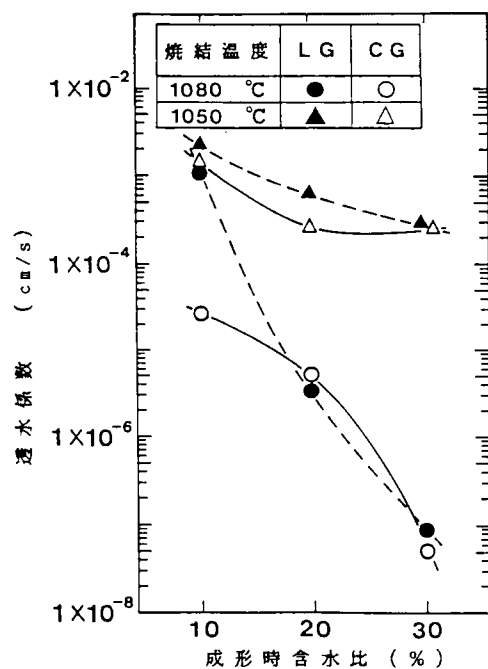


図-3.3.13 成形時含水比と透水係数の関係（安定材添加率10%）

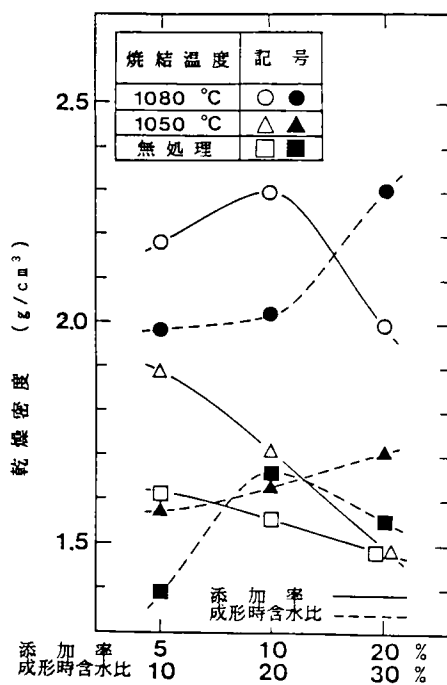


図-3.3.14 安定材添加率および成形時含水比と乾燥密度の関係（CG）

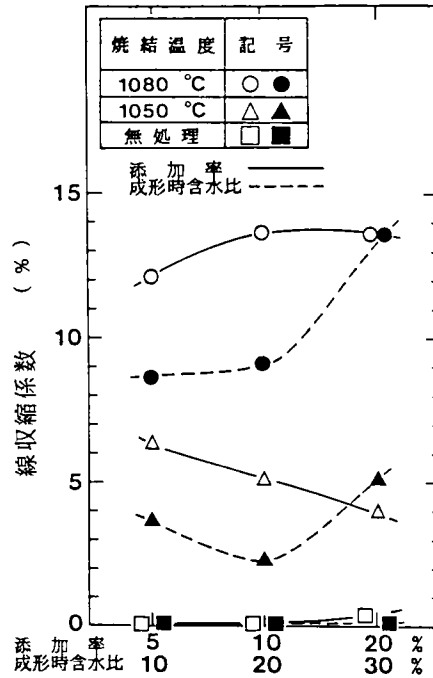


図-3.3.15 安定材添加率および成形時含水比と線収縮係数の関係 (C G)

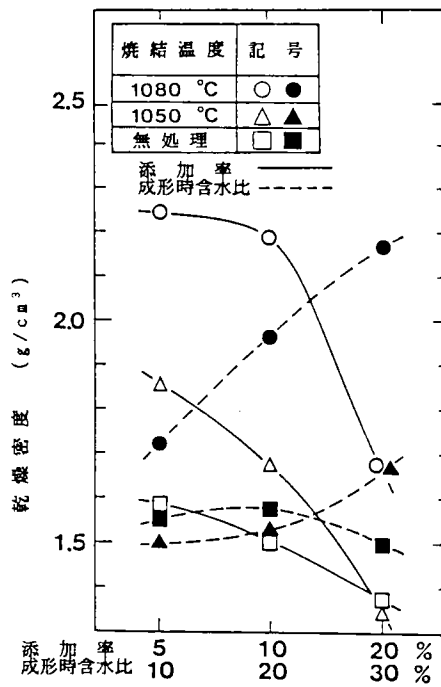


図-3.3.16 安定材添加率および成形時含水比と乾燥密度の関係 (L G)

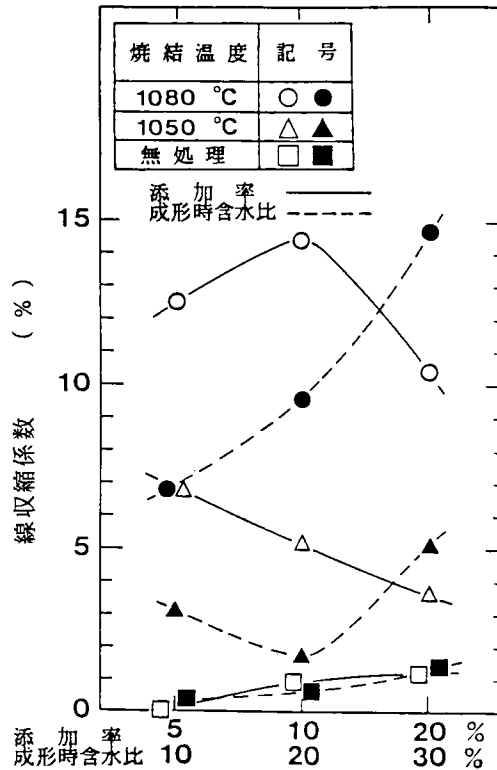


図-3.3.17 安定材添加率および成形時含水比と線収縮係数の関係 (LG)

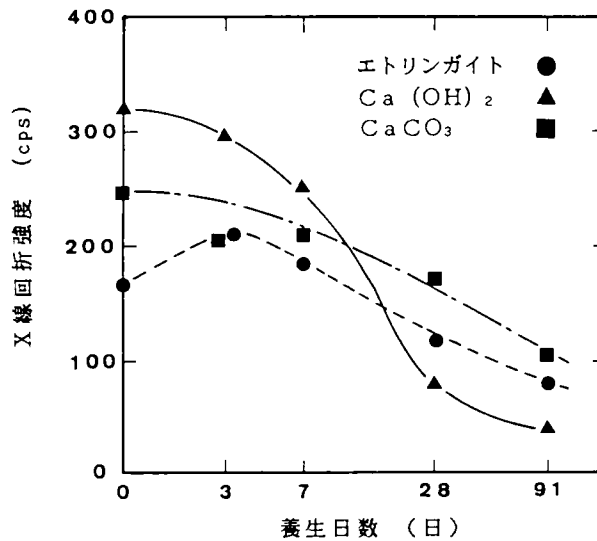


図-3.3.18 養生日数と反応生成物のX線回折強度 (LG 20%、破碎火山灰、最適含水比)

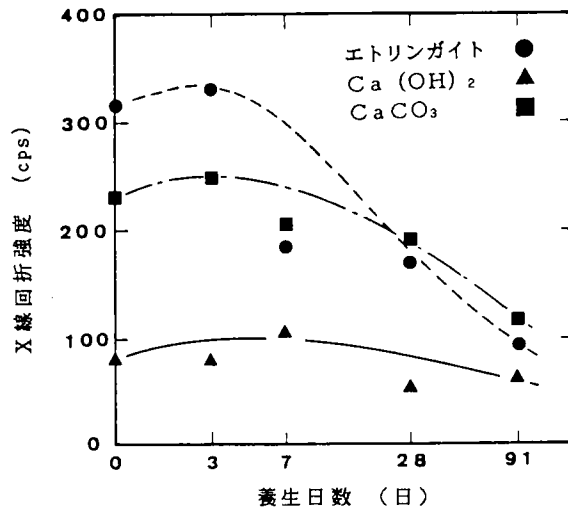


図-3.3.19 養生日数と反応生成物のX線回折強度  
(C G 20%、破碎火山灰、最適含水比)

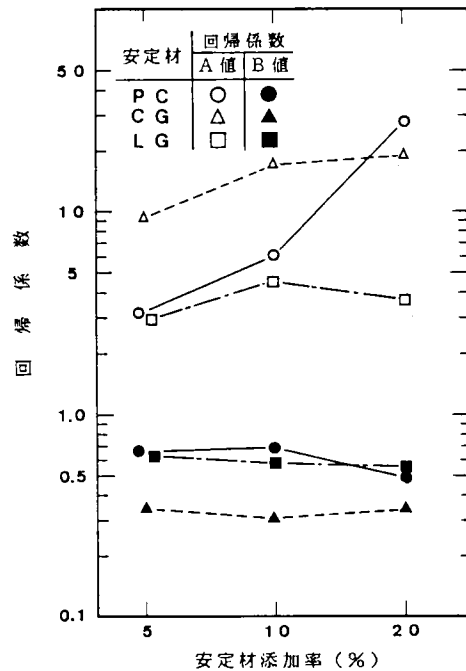


図-3.3.20 安定材添加率と回帰係数の関係 (最適含水比)

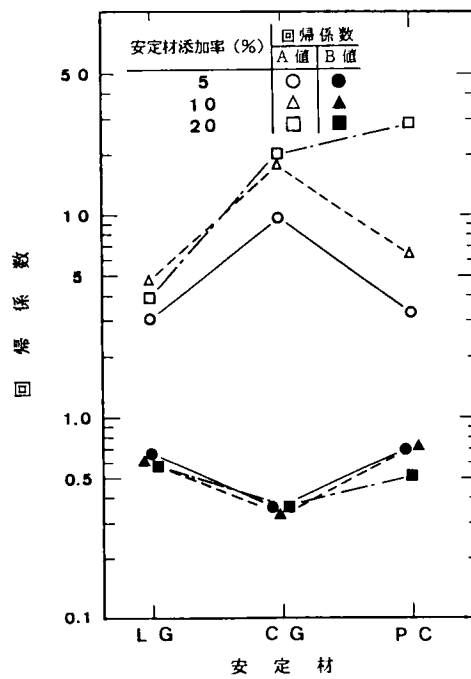


図-3.3.21 安定材の種類と回帰係数の関係 (最適含水比)

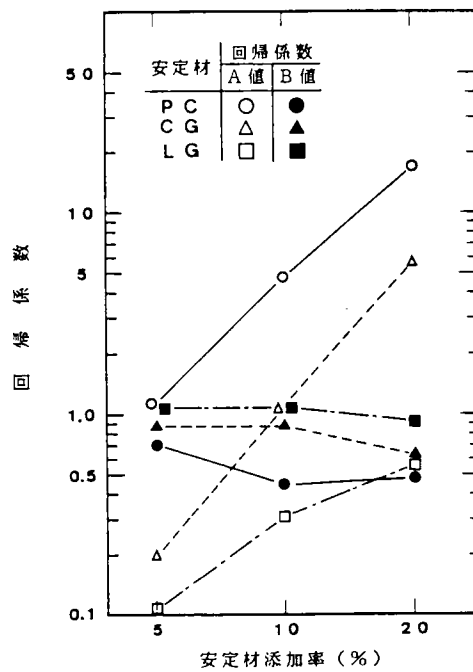


図-3.3.22 安定材添加率と回帰係数の関係 (含水比30%)

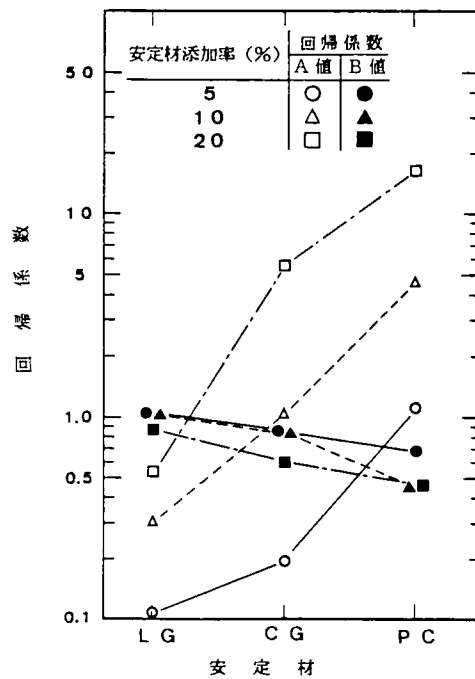


図-3.3.23 安定材の種類と回帰係数の関係 (含水比30%)

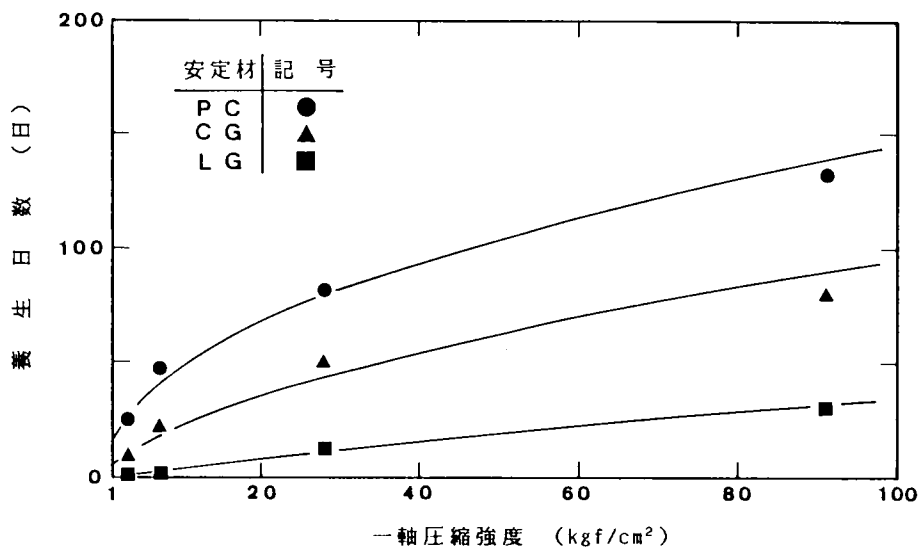


図-3.3.24 養生日数と一軸圧縮強度の関係  
(安定材添加率20%、含水比30%、回帰式(4))



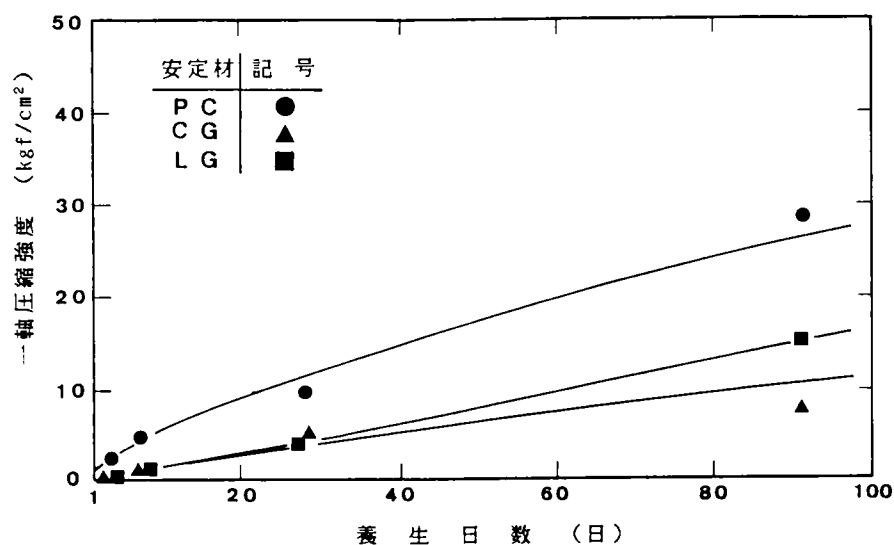


図-3.3.25 養生日数と一軸圧縮強度の関係  
(安定材添加率5%、含水比30%、回帰式(4))

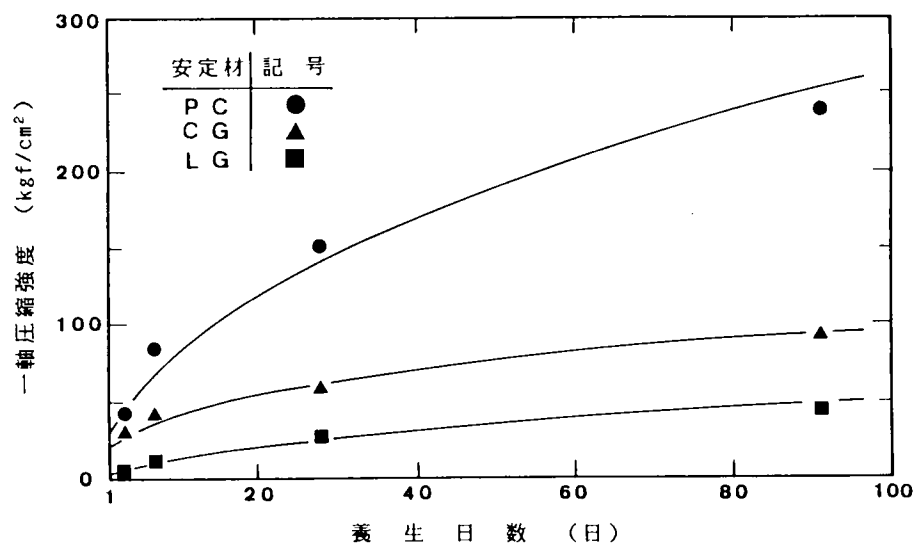


図-3.3.26 養生日数と一軸圧縮強度の関係  
(安定材添加率20%、最適含水比、回帰式(4))

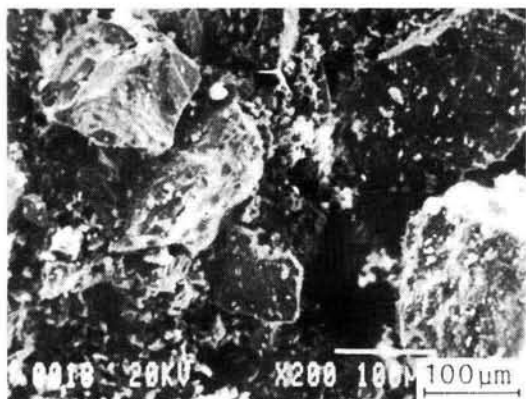


写真-3.3.1 火山灰のSEM像

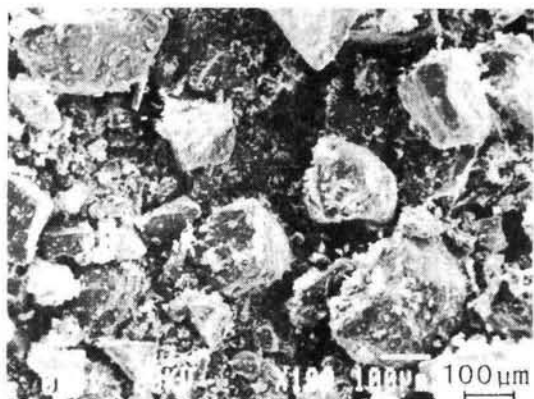
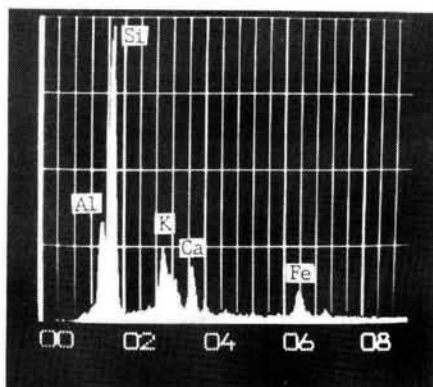


写真-3.3.2 破碎火山灰のSEM像



(a) SEM像



(b) 元素分析結果

写真-3.3.3 火山灰のSEM-EDXA分析結果

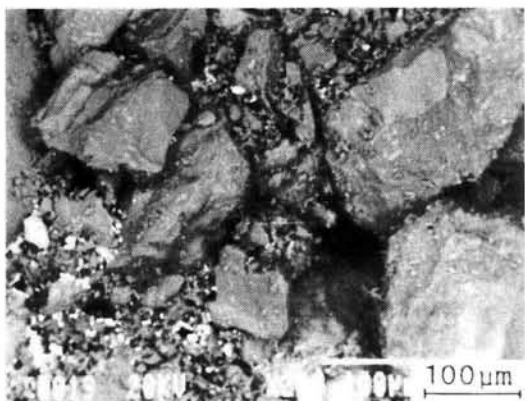
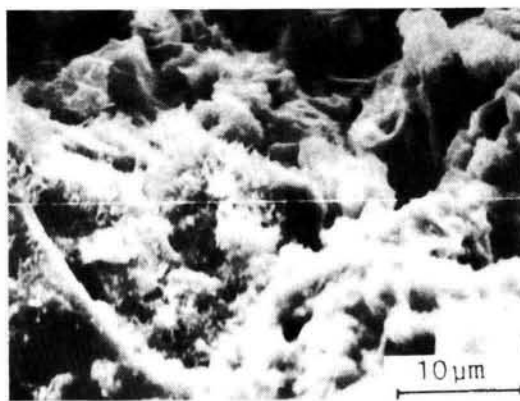


写真-3.3.4 火山灰の反射電子像



(a) SEM像

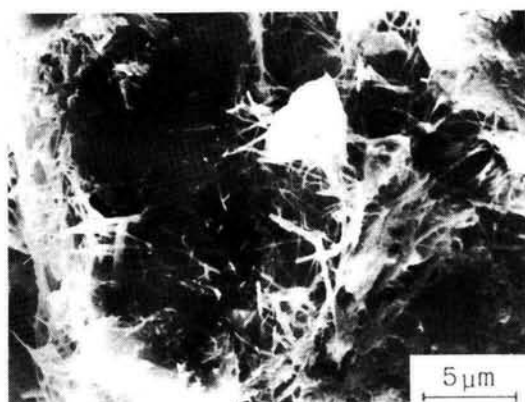
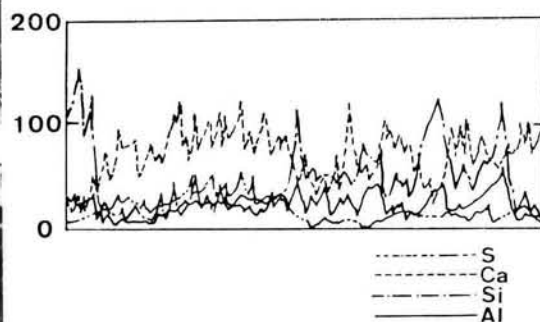


写真-3.3.5 固化処理灰のSEM像  
(LG 5%、3日養生、未破碎)



(b) 線分析結果

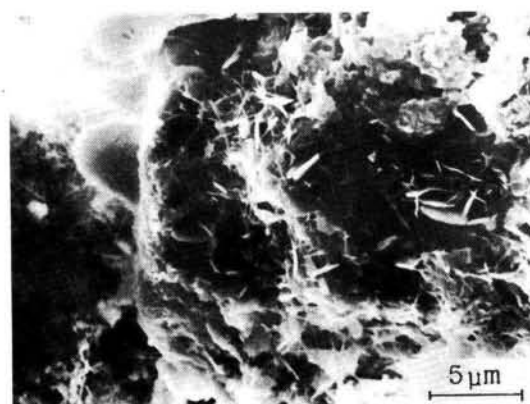
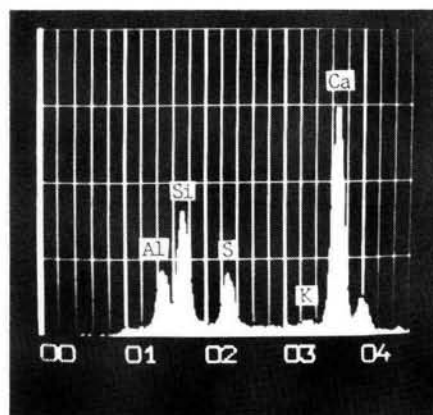
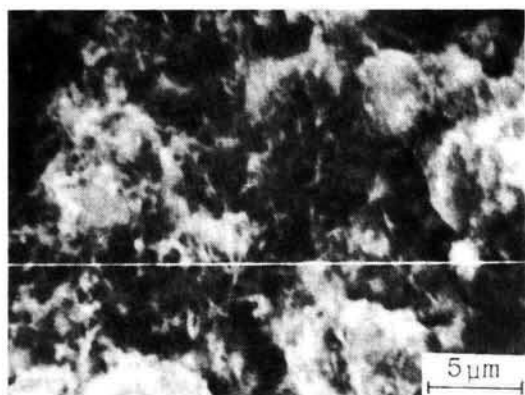


写真-3.3.6 固化処理灰のSEM像  
(LG 5%、3日養生、未破碎)

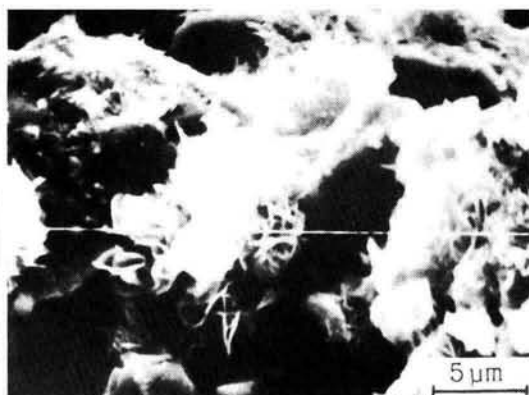


(c) 元素分析結果

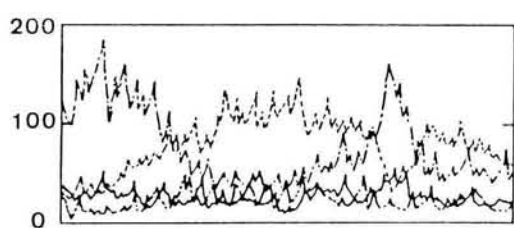
写真-3.3.7 固化処理灰のSEM-EDXA分析結果  
(LG 20%、28日養生、破碎)



(a) SEM像

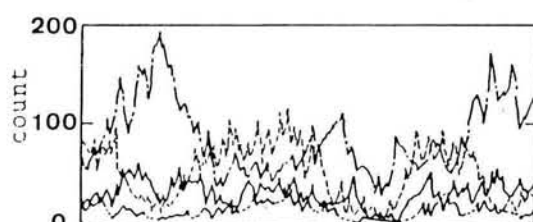


(a) SEM像

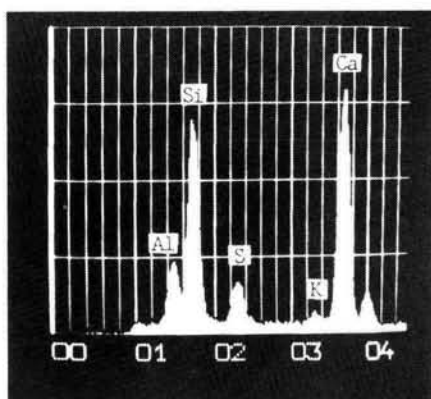


(b) 線分析結果

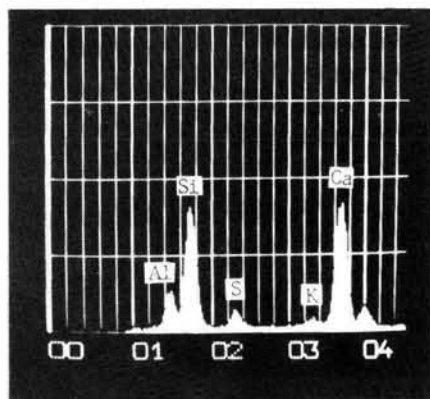
— S  
- - - Ca  
- · - Si  
— Al



(b) 線分析結果



(c) 元素分析結果



(c) 元素分析結果

写真-3.3.8 固化処理灰のSEM-  
EDXA分析結果  
(CG 20%、28日養生、破碎)

写真-3.3.9 固化処理灰のSEM-  
EDXA分析結果  
(LG 20%、28日養生、破碎)

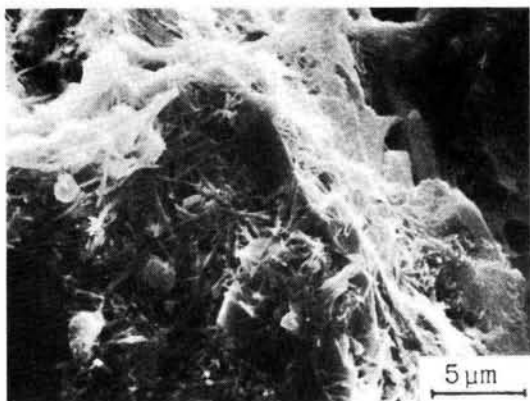


写真-3.3.10 固化処理灰のSEM像  
(LG 10%、3日養生、破碎)

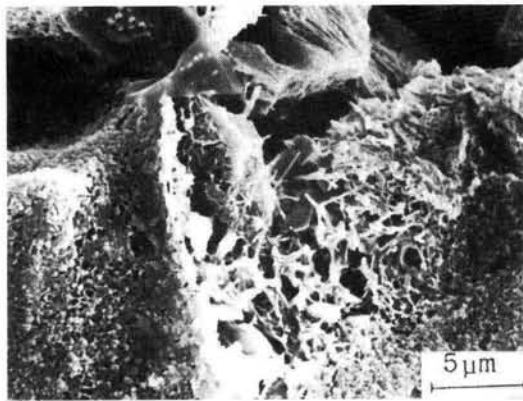


写真-3.3.11 固化処理灰のSEM像  
(LG 10%、7日養生、破碎)

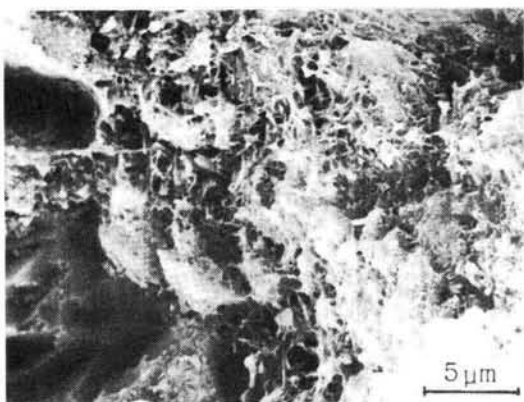


写真-3.3.12 固化処理灰のSEM像  
(LG 10%、28日養生、破碎)

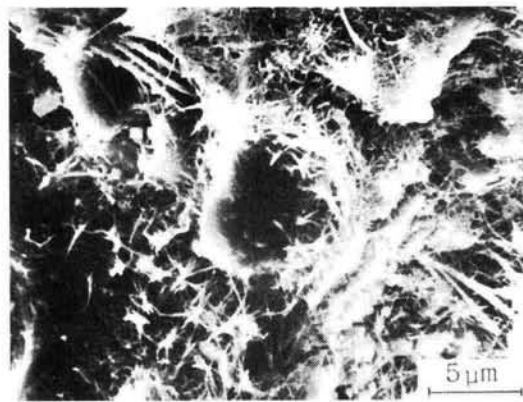


写真-3.3.13 固化処理灰のSEM像  
(CG 10%、3日養生、破碎)

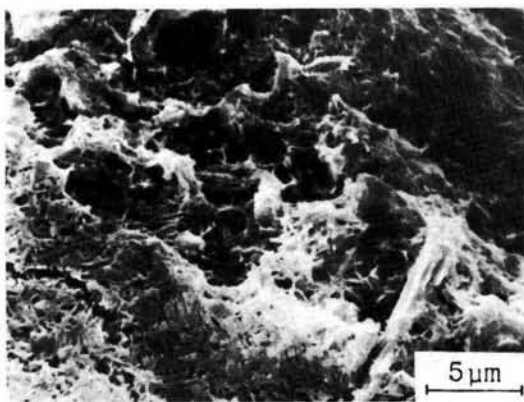


写真-3.3.14 固化処理灰のSEM像  
(CG 10%、7日養生、破碎)

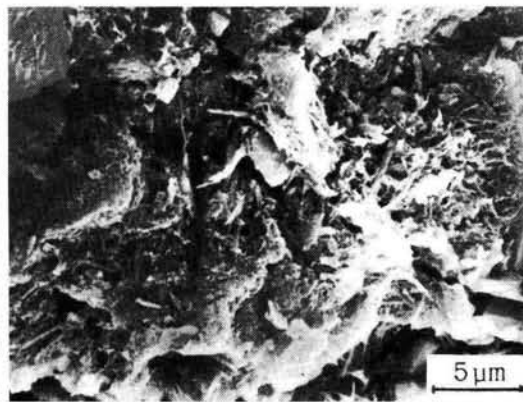


写真-3.3.15 固化処理灰のSEM像  
(CG 10%、28日養生、破碎)

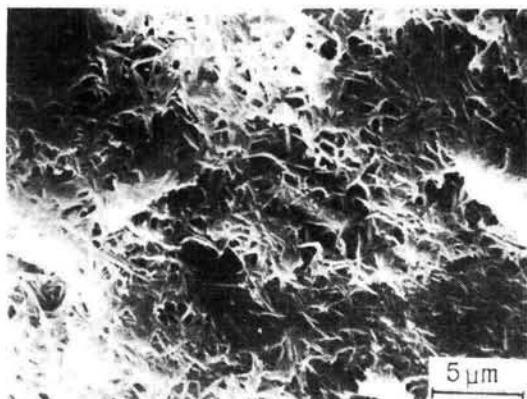


写真-3.3.16 固化処理灰のSEM像  
(CG 20%、91日養生、未破碎)

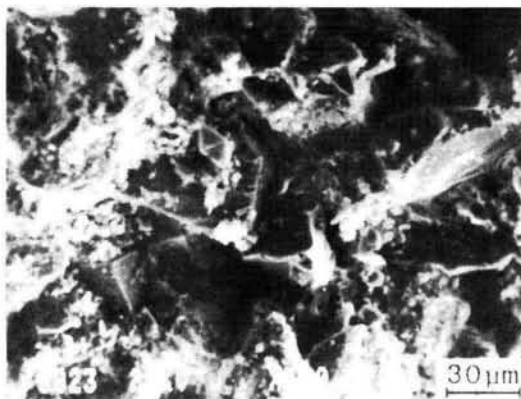


写真-3.3.17 板状供試体のSEM像  
(LG 20%、未焼結処理)

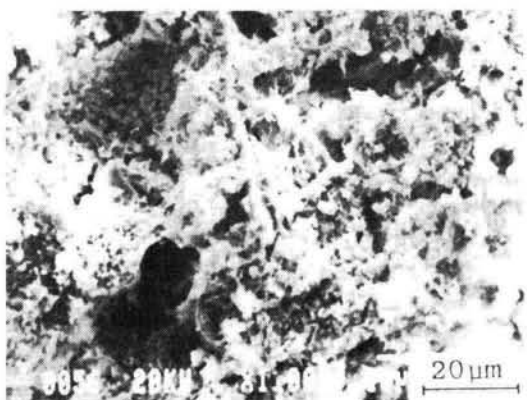


写真-3.3.18 板状供試体のSEM像  
(LG 20%、未焼結処理)

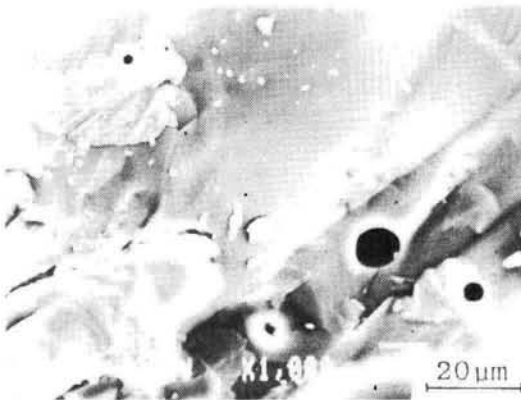


写真-3.3.19 板状供試体のSEM像  
(CG 5%、焼結処理1080°C)

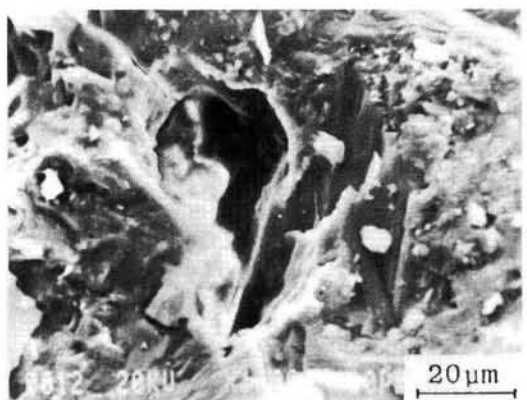


写真-3.3.20 板状供試体のSEM像  
(CG 20%、焼結処理1080°C)

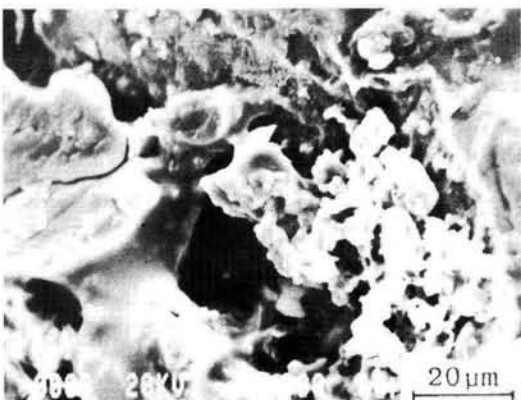


写真-3.3.21 板状供試体のSEM像  
(CG 5%、焼結処理1050°C)



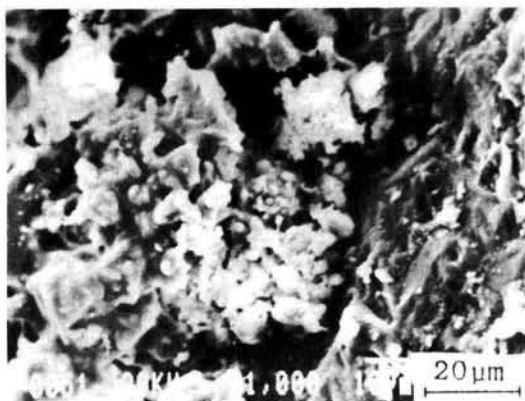


写真-3.3.22 板状供試体のSEM像  
(CG 20%、焼結処理1050°C)

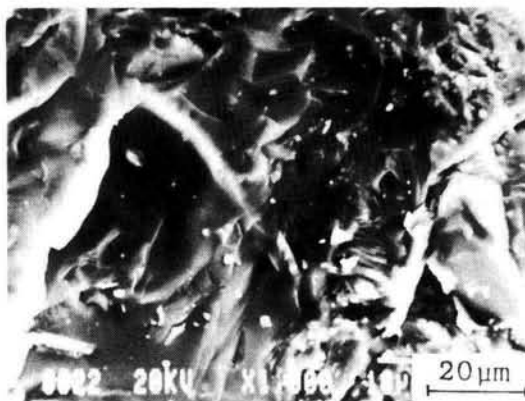


写真-3.3.23 板状供試体のSEM像  
(LG 5%、焼結処理1080°C)

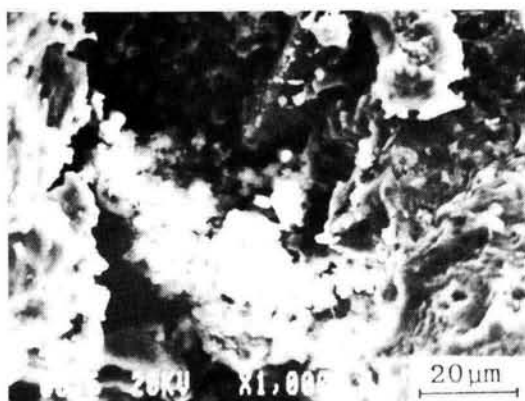


写真-3.3.24 板状供試体のSEM像  
(LG 20%、焼結処理1080°C)

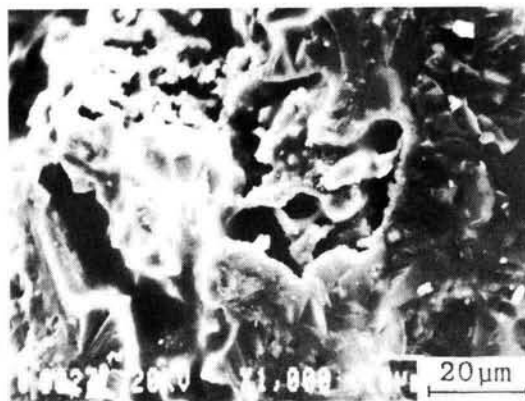


写真-3.3.25 板状供試体のSEM像  
(LG 5%、焼結処理1050°C)

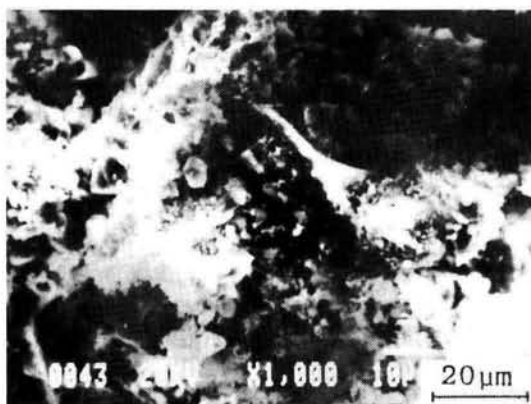


写真-3.3.26 板状供試体のSEM像  
(LG 20%、焼結処理1050°C)

### 3. 4 本章のまとめ

自然の発生試料として、粗粒土で硬化活性の低いまさ土、細粒土・高有機質で硬化活性の異なるべどろと沖積粘土、および硬化活性の高い降下火山灰を用いて安定処理を行い、その強度特性を追究し、有効利用の可能性について明らかにした。得られた結果をまとめると次のとおりである。

第1節では水砕スラグを添加したまさ土の石灰安定処理について、水砕スラグの粒径の変化、および養生方法の違いによる強度発現機構を検討した。

まさ土は硬化活性が低く石灰だけの添加では高い固化効果は得られなかった。そこで、固化効果を高めるため、処理土の締固めエネルギー、養生方法および水砕スラグの添加が強度発現に及ぼす影響について検討した結果、次のことが明らかになった。

(1) 安定処理土の強度は乾燥密度と密接な関係があり、締固めエネルギーの増大によって石灰量および水砕スラグ添加量を増加したものと同様の強度発現を示し、安定材添加量が節約できる。

(2) 安定処理土の硬化反応は試料からの $Al_2O_3$ や $SiO_2$ などの反応性元素の溶出に関係がある。

そして、その反応性元素の溶出促進のためには安定材によるアルカリ雰囲気が重要であり、安定処理土の強度発現を継続するためには安定処理土中に水分の存在する養生が必要である。

(3) 安定処理土の強度増大に最も関係する要素は石灰の添加の有無、および、その添加量である。水砕スラグの潜在水硬性は石灰の存在によって初めて強度発現に寄与し、その効果は石灰とほぼ同じ程度である。そして、粗粒の水砕スラグは硬化活性が低く、また、処理土の乾燥密度が減少するため大きな強度増加は期待できない。しかし、それを細粒化すると硬化活性は飛躍的に大きくなる。湿潤養生を行うとき、粒径が2.5mm以下の水砕スラグを $75\mu m$ 以下に破碎すると強度は約20倍になる。

水砕スラグを添加したまさ土の石灰安定処理において、強度発現の定式化を考えると、まさ土のような硬化活性の低い処理対象試料では石灰と細粒分の硬化反応はあまり期待できないため、処理土の強度発現においては水砕スラグのような副安定材と石灰の硬化反応が重要になる。処理土中に水分が存在する養生を行うと硬化反応性元素が溶出し、長期養生の強度増加が顕著となり、次の式(4)が適合する。

$$Y = A X^B \quad (4)$$

一方、処理土が乾燥する養生では養生初期の強度発現が大きく、長期養生による強度増加がほとんど見られないため、



$$Y = \frac{X}{A + B X} \quad (5)$$

の回帰式(5)で強度発現を表わすことができる。しかし、式(4)は養生の経過に伴う強度増加が大きいため、養生日数の適用範囲を限定して用い、それ以上の長期養生では式(5)を適用するなど、複数の式を用いて強度発現を検討することにより、処理土の品質管理や強度推定の精度が高くなり、一層の利用効果が図れるものと考えられる。

また、硬化反応生成物は養生初期にエトリンガイトやC S H系反応物が生成し、そして、長期養生ではC S H系、およびC A H系反応生成物や炭酸カルシウムの生成により強度の増加することが明らかになった。

第2節ではへどろや沖積粘土のような有機物含有量が多く、含水比の高い軟弱粘性土に対して固化処理を行い、強度発現を追究し、道路用材などの建設材料としての有効利用の可能性を検討した。また、処理土中の有機物（フミン酸）が強度発現に与える影響についても考察した。さらに、処理土の実用化を考え、生石灰と水砕スラグを添加した沖積粘土を用いて乾燥と水浸の繰り返しに対する耐久性について検討を行った。

へどろや沖積粘土の固化において、処理効果は試料土の粒度分布、粘土鉱物の種類やその含有量などに大きく影響され、安定材自身の固化とともに、処理土の含水比の減少や塑性の改良によって強度が増加することが明らかになった。

粘性土中のフミン酸が安定処理土の強度発現に及ぼす影響は含有量や、その種類により大きく異なる。固化強度は石灰系安定材に比べ、セメント系安定材を用いた方が高強度になるが、フミン酸が強度発現を阻害する影響は石灰系安定材の方が少ない。そして、へどろ中の有機物を除去することにより、セメント単独の添加だけでも大きな固化効果が得られた。

安定材としてセメント中に5%のC A S材を添加すると、セメントだけを添加した固化効果に比べて養生初期の強度増加が顕著になる。そして、12%程度の添加によって、養生3～7日で1.0kgf/cm<sup>2</sup>の一軸圧縮強度が得られ、路床および埋立て材料としての利用が可能となった。

一方、沖積粘土の石灰安定処理では水砕スラグの添加により長期的な強度の増加がみられ、その増加の程度は水砕スラグの粒径などの硬化活性の違いによるところの大きいことがわかった。そして、水砕スラグの活性の違いに応じて強度増加に貢献する最適の石灰添加量が存在することが明らかになった。

硬化反応生成物の分析によると、へどろ処理土の強度増加はエトリンガイトの生成量と線形関係が見られ、有機物を多く含有する試料に対するエトリンガイトの生成による処理効果への有効性が確認された。しかし、エトリンガイト以上にC S H系反応生成物が供試体の強度増加に大きく貢献していることがわかり、その剛性の程度によりエトリンガイトの強度への貢献度

も異なるようである。

安定処理土の耐久性は強度試験の結果とほぼ同じ傾向を示している。高強度が得られた安定材の配合で良好な耐久性を示し、処理土の劣化は細粒化と崩壊が同じ傾向で進行することがわかった。

次に、処理土の強度発現を回帰式で表すと、用いたへどろは粘土鉱物含有量が少なく、硬化活性の低いものであり、処理土の強度発現は安定材自身の固化によるところが大きい。そして、使用した安定材はセメントやC A S材の含有量が多いため、養生初期の強度発現が顕著であり、長期にわたる強度の発現が比較的小さいことより回帰式(5)が精度良く適合することがわかった。

一方、水砕スラグを添加した沖積粘土の石灰安定処理における強度発現は、水砕スラグの粒径の違いによる硬化活性に関わらず回帰式(4)で表され、長期にわたる強度発現がみられる。

第3節では九州桜島の降下火山灰を用いて石灰・セメント系安定材により固化処理し、また、焼結処理を施して建設材料としての有効利用の可能性について検討した。

降下火山灰は水溶性のAl、Si、S成分を多く含有しており、硬化活性の高い良好なボゾラン材料である。そして、粒子を破碎すると、さらに活性を高め、硬化反応を促進することがわかった。

安定材の添加による固化効果は、低添加率の場合、および養生初期の強度増加ではセメントに比べ、C A S材を混合したセメント系および石灰系安定材の方が有効である。しかし、高添加率および長期の強度発現はセメント単独の効果が大きい。そして、降下火山灰は石灰・セメント系安定材による固化処理により、5%程度の添加で下層路盤に、また、10%程度の添加により上層路盤に使用できることがわかった。

次に、締固めを行わないで成形した処理火山灰の強度試験結果では、成形時含水比の増加により流動性が大きくなり、施工方法の選択の幅を広くするが、強度の発現は最適含水比で成形したものに比べ半分以下になる。

処理灰の強度発現を回帰式で表わすと、セメントを用い最適含水比(約15%)で締固めたものは養生初期の硬化反応生成物により高い強度が得られるため、式(5)の回帰式がうまく適合することがわかった。しかし、火山灰が粗粒で均等粒径の試料であるために空隙が多いことと、反応性元素の溶出試験の結果より硬化活性の高い材料であるため養生に伴う強度の伸びも若干みられ、式(4)の適合性も良い。

一方、締固めを行っていない供試体は粒子間隙が大きく養生初期の強度増加は小さい。しかし、養生の経過により生成される硬化物が徐々に処理土の粒子間隙を埋め、長期にわたり強度が発現されるため、式(4)の放物線回帰式の適合性がよい。

次に、降下火山灰を養生初期に強度が増加する、石灰・セメント系C A S材で固化処理し、1050℃以上の高温で焼結処理することにより、高強度材料としての可能性が明らかになった。そして、固化処理灰の安定材添加量や成形時含水比および焼結温度の操作により、ポーラスで切削の容易な材料から、透水性のない高強度のものまで幅広い品質の材料が得られることがわかり、ブロックなどの土木材料やボード材、タイルなどの建築構造・化粧材料、および美術陶芸材料としての利用の可能性が明らかになった。

## 第4章 産業廃棄物の固化処理に関する研究

### 4. 1 水硬性粒度調整スラグの道路用材料としての品質特性と

#### 安定材による固化処理に関する研究

#### 4. 1. 1 概 説

わが国の基幹産業の1つである製鉄業は、この30年間に飛躍的な発展をとげ、近年の粗鋼生産量は年間約1億トンにのぼっている。この膨大な量の鉄鋼生産の過程においてスラグは生産される。その発生量は鉄鋼1トンあたり高炉スラグ300kg、製鋼スラグ150kgであり、高炉スラグだけでも年間3000万トン以上になっている。

高炉スラグは、高炉（溶鉱炉）で銑鉄を製造する際に発生する。高炉に装入される原料は鉄鉱石、フラックス、コークスであり、それらは次の関係である。鉄鉱石は銑鉄の原料そのものであり酸素と結びついた形で存在している。そして、その中には不要成分の $\text{SiO}_2$ や $\text{Al}_2\text{O}_3$ も含まれている。フラックスは一般に珪石や石灰石などが用いられ、不要成分の融点の低下およびスラグの流動性の改善になくてはならないものであり、また、コークスなどの原料に含有されている硫黄を銑鉄に含ませないように脱硫機能も果たしている。そして、コークスは燃料として装入される。これらを高炉内で燃焼融解すると銑鉄は底部の湯だまりにたまる。一方、不要成分をとり込んだフラックスは湯だまりの銑鉄の上に浮くようにたまる。そして一定時間ごとに比重の差（銑鉄は約7、スラグは約3.5）により分離して取り出される。取り出されたばかりの熔融スラグは約1500℃の高温であり、冷却方法により水砕スラグと徐冷スラグの二つの種類に分けられる。水によって急冷したものは非晶質の水砕スラグであり、結晶化へのエネルギーが潜在水硬性となり高炉セメントなどの材料として用いられている。一方、高炉横のドライビットに直接流し込むか、あるいは、鍋車で冷却ヤードまで運搬して薄く流し広げて、空冷あるいは散水によって徐々に冷却した徐冷スラグは結晶化が進み比較的安定した材料である。

高炉スラグの利用の歴史は古く、外国では1589年頃から使用された記録がある。わが国では1919年八幡製鉄所産のものが道路用材として利用されて以来、製鉄所内での使用がほとんど大部分を占めていたが、硫黄が溶出する黄水の問題もエージングすることにより解決し、各地で広く用いられるようになった。そして、1979年道路用スラグとしてクラッシュランスラグ、粒度調整スラグ、水硬性粒度調整スラグがJIS化<sup>1)</sup>され、路盤材として一般の道路に広く使用されるとともにコンクリート骨材や地盤改良材および埋立材料など多方面にわたって使用されている。

一般に、道路用スラグの特徴は次のようである<sup>2)</sup>。

(1) 水硬性を有しているので、施工後長期にわたって路盤の支持力が向上する。

(2) 粒子のかみ合わせが良く、かつ非塑性のため含水量の影響が少ないので、施工性に優れている。

(3) 製造は十分な品質管理のもとで行われるため、極めて安定した品質を備えている。

以上の長所と併せ、省エネルギーおよび省資源、自然保護の観点から、そして、とみに不足している自然骨材の代用資源として高炉スラグの活用は大きな意義をもっている。

また、最近では安定した材料として定着した道路用スラグをより有効的に活用するため、副産石こうなどを道路スラグと混合することにより、アルカリ分の溶出を促進し、強度発現を促す研究<sup>3)</sup>や、硬化活性の高い製鋼スラグと併用した複合スラグも実用化されつつある<sup>4)</sup>。さらに、強度の低い路床対策や交通量の増大、重交通への対応より高強度の路盤を作る必要性も生じている。

本節では、JISに定められ広く有効利用が図られている道路用スラグの水硬性粒度調整スラグ (Hydraulic and Mechanically Stabilized Slag、以下HMS-25と呼ぶ) について、数社の製鉄所で生産されているものの品質と強度特性について検討する。そして、HMS-25の養生方法の違いによる強度の発現傾向を明らかにし、水硬性を最も効果的に発揮する養生方法の提案を行っている。また、養生初期の強度促進と高強度材料としての利用を目的として安定材の添加、および養生方法の違いによる処理土の強度特性について検討する<sup>5), 6), 7)</sup>。

#### 4. 1. 2 材料特性と実験概要

用いた試料は4カ所の製鉄所から産出された5種類のHMS-25である。その化学成分および物理的性質は表-4.1.1, 2のとおりであり、各製鉄所から産出されているHMS-25の約10年来の平均的な値である。いずれの試料も粒度や呈色試験などはJIS規格を満足しているが、製造環境の相違により、物理特性には大きな違いがみられる。試料Aは薄層まき出しで製造されたものであり、冷却時の温度低下が早い比較的小ポーラスな部分やガラス質の多いものである。そのため単位体積重量、最大乾燥密度は小さく、最適含水比が高くなっている。一方、試料Cは高炉より鍋車で冷却ヤードまで運搬して製造するため熔融スラグの温度が低く、また冷却速度が遅いため、緻密な結晶構造の徐冷スラグである。そのため物理的性質は試料Aと異なったものになっている。そして、試料B、DはAとCの中間的な値のものである。しかし、試料B2はBと同じ製鉄所で生産されたものであるが、特異な物理特性を示している。一般に、各製鉄所毎に製鉄環境はほとんど一定であり、スラグの品質もあまり変化はないだけに特に注

目される試料である。また、HMS-25の化学成分は $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ と $\text{Al}_2\text{O}_3$ が主なものであり、自然の岩石と良く似ている。

供試体の作成および養生方法は表-4.1.3にまとめた。試験方法①はJISに定められた方法であり、直径10cm、高さ12.7cmのモールドを用い、ランマーは重さ4.5kgを高さ45cmより3層42回づつ自然落下させて締固めた。また、供試体の寸法や硬化活性の違いによる固化効果を追究するため、試験方法②③は5mm以下の試料を、ハーバード小型突固め試験機（直径約3cm、高さ約7cm）により試験方法①と同じエネルギーで締固めたものである。そして、以後、試験方法①の供試体は大供試体、試験方法②③のものを小供試体と呼ぶことにする。

試料の標準的な粒径加積曲線および大小供試体による締固め曲線は図-4.1.1, 2のとおりである。締固め試験では小供試体に比べて大供試体は高含水比の場合、値が一定しにくく、特に試料A, Bに乾燥密度のばらつきが目だった。これは粗粒率からもわかるように粒径が大きいことと、試料の保水能力の限界に近いことが原因と考えられる。すなわち、粒径が大きいため粒子間の接触面積が少なくなり、含水量の増加によりスラグ粒子と水との分離がみられ、また、透水性が高いため供試体突固め時に粗粒分がロ過作用を果たし、細粒子を粒子間隙に残して水が底版の方へ抜けたり、あるいは供試体上面へ浮き出た結果、乾燥密度のばらつきが生じたものである。

供試体成形時の含水比は大供試体についてはJIS法により最適含水比で行い、小供試体については硬化反応特性を調べるため最適含水比の前後である6、9、12%の3種類とした。そして、すべての供試体は所定日数養生後、一軸圧縮試験を行った。

一方、高強度材料を目的とした実験では、製造方法と物理的性質が大きく異なる試料AとCの二種類を用いた。安定材は $\text{Ca(OH)}_2$ と粉状の水砕スラグ（ブレン値約 $4000\text{cm}^2/\text{g}$ ）を用い、その配合などは表-4.1.4に示している。以後、安定材の配合は（石灰、水砕スラグ、石膏）の順に、試料の乾燥質量に対する百分率で表す。供試体の作製などは前記の大供試体と同じ方法で行った。ただし、試料Aは添加した安定材の反応効果を調べるため、成形時含水比を最適含水比より2～3%多い値で成形した。なお、試料の保水性の変化を調べるため強度試験後の試料を用いて加圧膜法によりpF試験を行った。

#### 4. 1. 3 水硬性粒度調整スラグの強度特性

図-4.1.3は大供試体の養生日数と強度の関係を示している。これによると養生日数の経過に伴い強度は試料B2を除き、よく似た傾向で増加していることがわかる。これはHMS-25の水硬性に基づくものであり、水との接触でスラグ中の $\text{CaO}$ 、 $\text{SiO}_2$ などの成分が溶出し、アル

カリ雰囲気中でポズラン反応などによる硬化反応生成物が生じた結果である。図-4.1.4は一軸圧縮試験における供試体破壊時の最大ひずみ量を示したものである。破壊時のひずみは養生日数、および強度の増加につれて減少していることがわかる。これは水和反応生成物により粒子間の空隙が減少し、供試体の構造の結びつきが強化されたことを示している。

大供試体の強度試験は、各試料をそれぞれの製造工場において時期をずらせ2回以上採取して行った。その結果は、ほとんどばらつきのないものであったが、試料Bの1つに他のものと比較して特に高い強度を示すものがあった。これを試料B2として図-4.1.3に示している。なお、試料B2は表-4.1.2の物理的性質においても特異な値のものである。この原因は試料B2は通常の試料より比重や単位体積重量が大きなものであり、供試体が高密度化し、硬化反応生成物による強度増加が特に顕著になったものである。また、破壊時の最大ひずみ量の変化から考え養生初期から供試体の剛性が高く、硬化活性の特に良い試料であり、この原因は製造条件の急変やサンプリングの偏りによるものと考えられる。

また、試料Bの一部には図-4.1.3にて破線で表しているように長期強度の大きく低下しているものがみられる。これは長期養生をすることにより、供試体中の鉄の塊が酸化して膨張性ひびわれを発生したため（写真-4.1.1, 2）であり、当然、短期養生では問題にならなかったものである。HMS-25の製造において粉碎、および粒度調整の際、数次にわたり磁選作業が行われるが、鉄の塊が残留している場合も少なくなく、長期強度の影響については鉄の塊の除去が重要であることを示している。

図-4.1.5は試料C、Dを用いた小供試体の養生日数、および養生条件の違いによる強度の変化を示したものである。これによると大供試体と同様、養生日数の経過とともに強度は増加している。気乾養生の供試体は湿潤養生のものに比べて養生初期から高い強度が得られる。しかし、一定期間養生後の湿潤養生供試体は、試料Dにみられるように急激な強度増加を示し、気乾養生の強度を上回るものが出現する。また、試料Cの長期強度についても大供試体の長期強度（図-4.1.3）を考え合わせると、D供試体と同様に湿潤による急激な強度増加が明らかである。この湿潤養生の強度増加は先に述べたように、供試体中の水分が重要な役割を果たしており、湿潤養生および2週間毎に1時間水浸する養生方法が処理土中のアルカリ分を溶出し、長期にわたり潜在水硬性を発揮させた結果である。また、成形時含水比では最適含水比の9%と、それより低い6%は似た強度になっているが、最適含水比より多めの12%のものは小さな強度になっている。

図-4.1.6は試料Cの成形含水比約9%の供試体について、養生日数と強度の関係を示したものである。また、図-4.1.7はこれを供試体寸法および養生方法についてまとめたものである。これによると最大粒径の大きい大供試体の試料が高強度を与えることは明らかである。一

方、前述したように養生方法が異なるので比較することは困難であるが、養生初期（8週ぐらいまで）では大供試体と小供試体の強度増加の傾向がよく似ている。これはスラグの硬化活性が細粒子に関わるところが大きく、小供試体により大供試体の強度を推定できることを示している。従って、試料CではJISに要求されている大供試体の2週強度 $12\text{kgf/cm}^2$ を得るには、小供試体の気乾養生で2週強度が $3\text{kgf/cm}^2$ あれば良いことになり、小供試体での試験は試験方法の簡便化に役立つものと考えられる。しかしながら、図-4.1.7中の試料Cと試料Dでは大供試体と小供試体の強度の差が明らかに異なり、試料毎に強度の発現傾向を検討しておく必要がある。

#### 4. 1. 4 安定材を添加した水硬性粒度調整スラグの強度特性と 固化処理の最適処理条件の推定

水硬性粒度調整スラグに安定材を添加して固化効果を高め、高強度材料としての利用を検討する。安定材としては石灰、水砕スラグおよび石膏を用い、異なる養生方法を実施して強度特性を調べている。

##### (1) 石灰と水砕スラグを添加した水硬性粒度調整スラグの強度特性

図-4.1.8は試験方法④の試料Cの養生日数に対する強度変化を示している。図-4.1.8(a)は安定材を添加していない供試体である。これによるとパラフィン養生は養生日数に関係なく強度が低く、ほぼ一定の値となっているが、その他の気乾、くり返しおよび湿潤養生では養生日数の経過に従い強度はわずかつつ増加していることがわかる。これはHMS-25の潜在的な水硬性と、供試体の乾燥による構造的な剛性の増加に基づくものと考えられる。しかし、長年にわたる大きな強度増加は期待できないようである。そして、供試体が常に水分の多い状態にあると強度の発現はほとんどみられないことがわかる。

図-4.1.8(b)は水砕スラグだけを5%添加した供試体である。これによると無添加のものに比べ、全般的に強度は大きくなっており、くり返し、パラフィン養生の強度増加の大きい群と、湿潤、気乾養生の強度増加の小さな群の二つに分かれている。図-4.1.9は養生中の供試体の含水比を示している。この二つの図を比べると、強度発現は供試体の養生中の含水比の変化と大きな関係のあることがわかる。すなわち、気乾養生では養生の経過とともに含水比は低下し、それに伴い強度増加の割合は徐々に小さくなり、強度は一定の値へ収束している。一方、パラフィンおよびくり返し養生は養生の経過に伴い強度は著しく増加している。これはパラフィン



養生は長期にわたる養生においても供試体成形時の含水比をほぼ保っており、そして、くり返し養生では2週間に1日間の水浸により供試体は水で満たされるためである。また、湿潤養生は強度は低いながらも長期的には少しづつ増加の傾向にある。これは養生の経過とともに徐々に減少している供試体含水比が、4週間養生後には増加方向に転じており、供試体が養生室内の水分を逆に吸収したためである。この原因は供試体中に吸水性の高い硬化反応物が生成され、水砕スラグの比表面積が増加した<sup>9)</sup>ものと考えられる。これらの結果、供試体中に水分が吸収されるような養生方法では、微細な反応生成物に吸着された水がさらに添加したスラグ粒子表面の $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、および $\text{CaO}$ の溶出を促進し、水和反応物を析出することにより一層の硬化反応を促進するものである。

次に、石灰と水砕スラグを併用した配合(2, 5, 0)の養生日数と強度の関係を示したものが図-4.1.8(c)である。図-4.1.8(a), (b)と比べ各養生方法とも養生初期の強度の大きいことがわかる。そして、それ以後は強度増加の速度は遅いが、供試体中の含水比の高い湿潤、くり返し、パラフィン養生において長期にわたる強度増加が期待できそうである。この短期強度の増加は添加された石灰のアルカリ刺激により水砕スラグの潜在水硬性が発揮され高強度になったものである。しかし、その後の硬化反応が遅い原因については明らかではないが、急激な反応により生じた生成物がスラグ粒子表面を覆い、その後の反応を阻害した<sup>10)</sup>ことが考えられる。

## (2) 石灰、水砕スラグおよび石膏を添加した水硬性粒度調整スラグの強度特性

図-4.1.10は試験方法⑤の試料Cの養生日数に対する強度変化を示したものである。これによると養生の経過に伴う強度変化の傾向は表-4.1.5に示す三つの群に分けることができる。Ⅰ群は石灰、石膏を各々単独で添加したものである。強度は無添加の試料とほぼ同じ値であり、気乾、およびくり返しのいずれの養生においても長期強度の増加がみられない群である。Ⅱ群の特徴は気乾養生では長期にわたる強度増加はみられないが、くり返し養生をすると大きな強度増加がみられることである。この群の配合に共通する成分としては無添加の試料にも含まれている水砕スラグがあげられる。Ⅲ群は石灰と石膏の配合、および三種類の安定材を併用したものであり、硬化反応性の低い気乾養生でも長期にわたって強度増加がみられる。しかし、くり返し養生を行うと養生中の供試体のクラックのため強度が低下したり、供試体の自立さえ困難な状態になる(写真-4.1.3, 4)。以上の結果から考えると、くり返し養生で大きな強度増加のみられたⅡ群は、供試体養生中の水分の存在およびアルカリ刺激により試料中の水砕スラグが潜在水硬性を発揮したものであり、また、石膏の併用により硫酸イオンによる固化効果も配合(0, 2, 2)で顕著に表れている。しかし、配合(0, 2, 0)と(2, 2, 0)を比較すると、石灰の併用は強度増加に貢献していないようである。また、Ⅰ群の石灰、石膏単独の添加は反応性

の高いくり返し養生においても強度は低い値となり、石灰および石膏を添加した効果はみられない。一方、Ⅲ群は反応性の低い気乾養生においても長期にわたる強度の増加がみられ、硬化反応が進んでいることを示している。これは反応性イオンの $\text{SO}_4^{2-}$ が供給されたためであり、強度発現に関係深いエトリンガイトが生成されたことをX線回折や電子顕微鏡で確認している。しかし、反応性の高いくり返し養生を行うとエトリンガイトの生成が特に顕著となり、その結果、供試体に膨張クラックが生じたものである。

図-4.1.11は試験方法④の試料A、配合(0,5,0)の養生日数に対する強度変化を示している。また、図-4.1.12は各種の安定材の配合と養生方法による2週間と20週間養生後の強度を示している(配合(2,2,2)の20週間養生後は供試体の膨張クラックのため強度試験はできなかった)。無添加の試料ではいずれの養生方法でも2週間強度でJIS規格に定められている $12\text{ kgf/cm}^2$ に達していないことがわかる。これは供試体成形時の含水比が最適含水比より2~3%高いためであり、硬化反応性の低い気乾養生では20週間養生後も強度は約 $9\text{ kgf/cm}^2$ であり、強度増加はほとんどみられない。しかし、養生中に水分が供給される他の養生方法や安定材を加えた試料では長期にわたる強度増加が顕著になっており、パラフィン養生では20週間後の強度は2週間養生の約5倍の値を示している。また、図-4.1.12の水砕スラグに石灰を併用した配合(2,5,0)では初期強度が他の配合に比べ特に大きく、水砕スラグを多く含有する試料では石灰の添加が強度増加に貢献することを示している。

図-4.1.13は試料AとCの同じ安定材の配合を比較したものである。無添加試料の気乾養生では試料CはJISに定められている強度基準(2週間養生で $12\text{ kgf/cm}^2$ )を満たしており、20週間養生後には $17\text{ kgf/cm}^2$ となっている。一方、試料AはCの約60%の強度であり、供試体成形時の含水比が多いため固化程度は低くなっている。しかし、反応性の高いくり返し養生を行うと試料AはCの強度に近い値になっている。さらに、すべての安定材を添加した配合(2,2,2)では気乾養生でも試料AはCとほぼ同じ値になっている。これは石灰と水砕スラグの併用により極く短期間の養生で硬化反応が進み供試体の剛度が上がったものであり、以上の結果は道路用スラグの施工にあたり、試料の含水比の管理と転圧の重要性を示している。そして、硬化活性の低い道路用スラグでも硬化反応を促進する養生方法を採用するか、安定材を添加することにより十分大きな強度の得られることが明らかになった。

次に、強度試験後の試料の保水性について $pF=1.6$ のときの水分量を測定した結果が図-4.1.14である。これによると試料の保水性は養生方法で気乾、湿潤、くり返し、パラフィンの供試体中の水分の多い養生ほど、また、配合(0,0,0)、(0,5,0)、(2,2,2)と安定材の多いほど高い値となり、粒子表面の硬化反応物の生成量と関係していることがわかる。そして保水性の向上は反応性イオンの溶出を促進し、さらに反応効果が顕著になるものと考えられる。

#### 4. 1. 5 反応生成物の同定と微視的構造

写真－4.1.5は試料Cの養生前の電子顕微鏡写真である。スラグ粒子が締固めにより一体化しており、粒子表面の凸凹がかみ合っている様子がみられる。また、一部の粒子表面には既に硬化反応が始まっている線状の反応生成物がみられる。写真－4.1.6～8は各種の養生を行った約1年後のものである。写真－4.1.6は試験方法②の気乾養生のものであるが、スラグ表面を箔状の反応生成物や微細な粒子が覆い、スラグ粒子の輪郭が見えにくくなっている。しかし、供試体成形時の状態のままの未反応の粒子表面もみられる。次に、試験方法③の湿潤養生（写真－4.1.7）では反応生成物が明確になり、板状の水和物が重なり合って生成し、スラグ粒子表面を覆っている。また、写真－4.1.8は試験方法①のJIS法のものである。湿潤養生にみられた板状の他に棒状のものや粒子表面を覆っている箔状や微細粒子の水和生成物が確認でき、反応生成物が供試体を一体化して剛性を増加していることがわかる。そして、JIS法のくり返し養生を行うと最も硬化反応物の生成が顕著であることがわかる。

写真－4.1.9は長期強度において他の養生方法より高強度を示した試料B2のJIS法による1年養生後のものである。これによると試料Cと比較し、確認できる水和物の生成密度が高くなっており、これが高強度の原因と思われる。以上の結果、高炉スラグの水硬性を発揮させるには、試験方法①のように気乾と水浸をくり返し行う養生が有効であり、スラグ路盤は適当な乾湿のくり返しのある場合に大きな強度を発揮することがわかる。

表－4.1.6は試験方法④の比較的反応が進んでいると考えられる配合(2,5,0)の供試体のX線回折、および熱分析結果をエトリングライトと $\text{CaCO}_3$ の反応生成物についてまとめたものである。これによるとエトリングライトは供試体中の含水量の多いくり返し、湿潤、パラフィン養生にて生成量が多くなっており、水砕スラグから硫黄などの成分が溶出したことを示している。また、 $\text{CaCO}_3$ はCa成分と空気中の $\text{CO}_2$ との反応で生成されるものであり、気乾養生では硬化反応に関与しなかったCa成分が炭酸化したため、特に多い生成量になったものである。これらの反応生成物はいずれも供試体粒子の間隙を埋め、構造をち密化し、ボゾラン反応生成物とともに供試体の高強度の要因となるものであり、強度試験の結果を裏付けている。

図－4.1.15は試験方法①の大供試体において、一軸圧縮試験前の1日間水浸したときの吸水率を示したものである。これによると養生日数の経過に伴う強度の増加に応じて吸水率が増加していることがわかる。これは写真－4.1.6～9にみられるように水硬性によってスラグ粒子表面に生成された水和物により処理土の表面積が増大した結果であると考えられる。

#### 4. 1. 6 本節のまとめ

現在、路盤材として広く用いられている水硬性粒度調整スラグの物理的性質と強度特性について検討した。また、養生初期の強度促進と高強度材料としての利用を目的して安定材の添加、および養生方法の違いによる水硬性粒度調整スラグの強度発現について追究した。得られた結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 水硬性粒度調整スラグは水砕スラグを含有しており、その水硬性により養生の経過に伴って長期間にわたり強度が増進する。しかし、その強度増進の程度は水硬性粒度調整スラグの締固めの程度によって大きく異なり、締固め時の含水比の管理は大変重要である。
- (2) 水硬性粒度調整スラグは原材料、製造施設、製造方法および粒度調整方法によって物理的性質の違いはあるが、それぞれの製鉄所毎に品質はほぼ定まっており、強度などのJIS規格を達成している。そして、物理的性質と強度は密接な関係があり、物理的性質を管理することにより強度特性の管理の目安になることがわかった。また、水硬性粒度調整スラグ中の鉄分は長期養生で酸化し、膨張クラックの原因となるため、製造時の鉄分の除去は重要である。
- (3) 水硬性粒度調整スラグの潜在水硬性を促進させ、長期強度を高めるためには湿潤養生、および気乾と水浸をくり返して行う養生方法が有効である。処理土中の水分はスラグ粒子からのアルカリ分の溶出を促進し、微細な硬化反応生成物をスラグ粒子表面に形成し、供試体の剛性を高める。また、硬化反応生成物の表面積の増加によって吸水率も増大し、微細な反応生成物に吸着された水がさらにスラグ粒子表面の $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、および $\text{CaO}$ の溶出を促進し、水和反応物を析出することにより一層の硬化反応を促進する。
- (4) 水硬性粒度調整スラグの硬化反応はスラグの細粒子の影響が大きいため、5 mm以下の粒子を用いた小供試体によりJIS A 5015に定められた方法の強度が推定でき、試験方法の簡便化に役立つ。しかしながら、試料毎に強度の発現傾向は異なるため前もってその傾向を検討しておく必要がある。
- (5) 水硬性粒度調整スラグを高強度材料として利用するため、安定材として水砕スラグを添加し供試体含水比の高い養生方法を行うと強度は長期にわたり増進する。また、石灰の併用により養生初期の強度が著しく大きくなる。さらに、石灰や水砕スラグに石膏を併用すると、硫酸イオンによる固化効果が顕著になり、反応性の低い気乾養生においても長期にわたる強度の増加がみられる。しかし、硬化反応性の良い供試体中に水分の多い養生を行うと、エトリンガイトの生成により膨張クラックのため供試体は破壊する。
- (6) 固化処理した水硬性粒度調整スラグの強度増加には硬化反応物としてエトリンガイトと $\text{CaCO}_3$ の生成が有効である。

## 参 考 文 献

- 1) 日本規格協会：道路用スラグ、JIS A 5015、1979.
- 2) 芳賀信豪、大川雄一、今野美千雄、河本敬之、溝口郁夫：道路用材としての製鋼スラグの利用、製鉄研究、新日本製鉄（株）、No. 302, pp. 1～16, 1980.
- 3) 内田一郎、M. R. Karmacharya、藤原彰信：高炉鉱さいを使用した路盤材について、土と基礎、Vol. 23, No. 8, pp. 11～18, 1975.
- 4) 佐藤康文、橋本実、田上健児、渡辺良男：水硬性粒度調整複合スラグの水硬性について、第40回土木学会年次学術講演会概要集第5部、pp. 507～508, 1985.
- 5) 澤孝平、友久誠司：路盤用高炉スラグ碎石の一軸強さに関する実験的研究、明石工業高等専門学校研究紀要、No. 24, pp. 39～48, 1982.
- 6) 澤孝平、友久誠司：道路用スラグの一軸圧縮強度に関する実験的研究、第20回土質工学研究発表会概要集、pp. 1601～1602, 1985.
- 7) 澤孝平、友久誠司：道路用スラグの一軸圧縮強度に関する実験的研究（その2）、第41回土木学会年次学術講演会概要集第3部、pp. 525～526, 1986.
- 8) （社）日本鉄鋼連盟：製鋼のスラグ、p. 23, 1977.
- 9) （株）神戸製鋼所：高炉水砕スラグによる軟弱地盤改良材、（株）神戸製鋼所、pp. 8～9, 1980.
- 10) 野村高照、榎戸恒夫、鈴木章平、徳永良邦、稲山邦彦：高炉水砕スラグの硬化特性とその抑制策、製鉄研究、新日本製鉄（株）、No. 301, pp. 19～28, 1980.

表－4.1.1 高炉スラグの化学成分<sup>8)</sup>

(%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	S	FeO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
30 ～ 41	12 ～ 20	35 ～ 45	3 ～ 7	0.2～ 2.2	0.6～ 1.6	0.3～ 1.7	0.3～ 1.7	0.004～ 0.051

表－4.1.2 水硬性粒度調整スラグの物理的性質

試料	比重	吸水率 (%)	粗粒率	単位体積重量 (tf/m <sup>3</sup> )	最適含水比 (%)	最大乾燥密度 (t/m <sup>3</sup> )
A	2.36	3.18	5.10	1.690	11.1	2.07
	2.55	4.99	2.84			
B	2.35	3.87	4.93	1.660	12.3	2.01
	2.51	7.86	2.93			
B 2	2.63	2.74	4.59	1.920	9.4	2.24
	2.69	4.48	2.67			
C	2.49	3.22	4.50	1.820	9.4	2.21
	2.72	5.11	2.75			
D	2.43	3.22	4.55	1.640	10.4	2.17
	2.68	5.44	2.79			

注1) 試料B 2はB製鉄所産の水硬性粒度調整高炉スラグ碎石の特異な試料である。

注2) 比重、吸水率、粗粒率の各項については上段が粗骨材(25～10mm)、下段が細骨材(5～0mm)の値である。

注3) 最適含水比、最大乾燥密度は大供試体の値である。

表－4.1.3 供試体作成および養生方法

試験方法	最大粒径 (mm)	供試体寸法 直径×高さ(mm)	成形時含水比 (%)	養生方法
①	25	100×127 (大供試体)	最適含水比 (約9%)	20℃の気乾、2週間毎に1時間水浸 圧縮試験前1日間水浸
②	5	30×70	6、9、12	室温の気乾
③		(小供試体)		20℃、95%以上の恒温恒湿槽内

表-4.1.4 安定材の配合と養生方法

試験方法	試料	配合比 (%)			養生方法	
		石灰	水砕スラグ	石膏	名称	内容
④	A、C	0	0	0	気乾	室温の気乾
		0	5	0	湿潤養生	20℃、95%以上の恒温恒湿室内
		2	5	0	くり返し	室温の気乾、2週間毎に1日間水浸
		2	2	2	パラフィン	パラフィンで被覆後、20℃の恒温室内
⑤	C	2	0	0	気乾	室温の気乾
		0	2	0		
		0	0	2	くり返し	室温の気乾、2週間毎に1日間水浸
		2	2	0		
		2	0	2		
		0	2	2		

表-4.1.5 安定材の配合と長期養生の強度発現傾向

群	長期養生の強度発現傾向		安定材の配合比 (%) (石灰、水砕スラグ、石膏)
	気乾養生	くり返し養生	
I	無変化	無変化	(2, 0, 0), (0, 0, 2)
II	無変化	増加	(0, 0, 0), (0, 2, 0), (2, 2, 0), (0, 2, 2)
III	増加	——	(2, 0, 2), (2, 2, 2)

表-4.1.6 X線回折および熱分析試験の結果

配合 (2, 5, 0)

養生方法	X線回折ピーク強度 (cps)		熱重量分析減量 (mg)	
	エトリンガイト (9.7 Å)	炭酸カルシウム (3.03 Å)	120℃付近	760℃付近
気乾	986	5,499	1.1	1.4
湿潤	1,404	3,433	1.5	0.6
パラフィン	1,440	4,979	1.3	2.1
くり返し	1,536	5,054	1.7	1.3

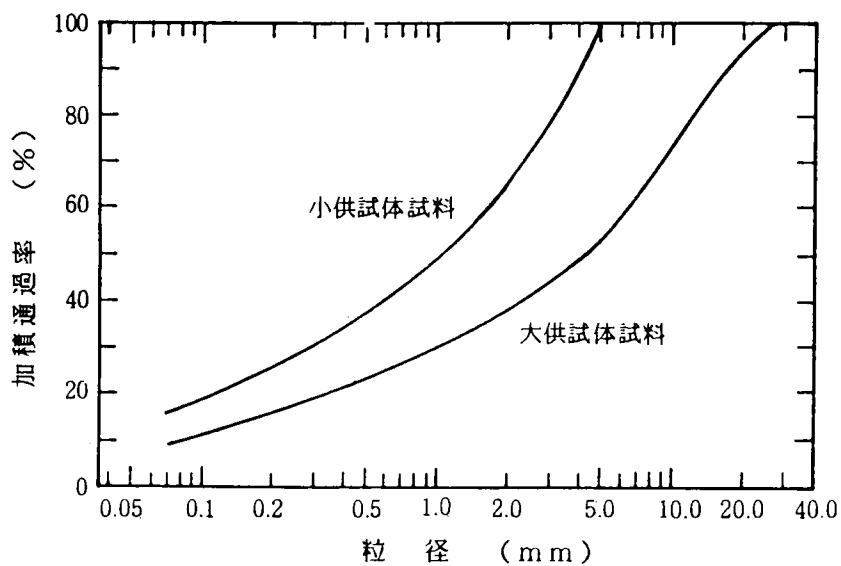


図-4.1.1 水硬性粒度調整スラグの粒径加積曲線

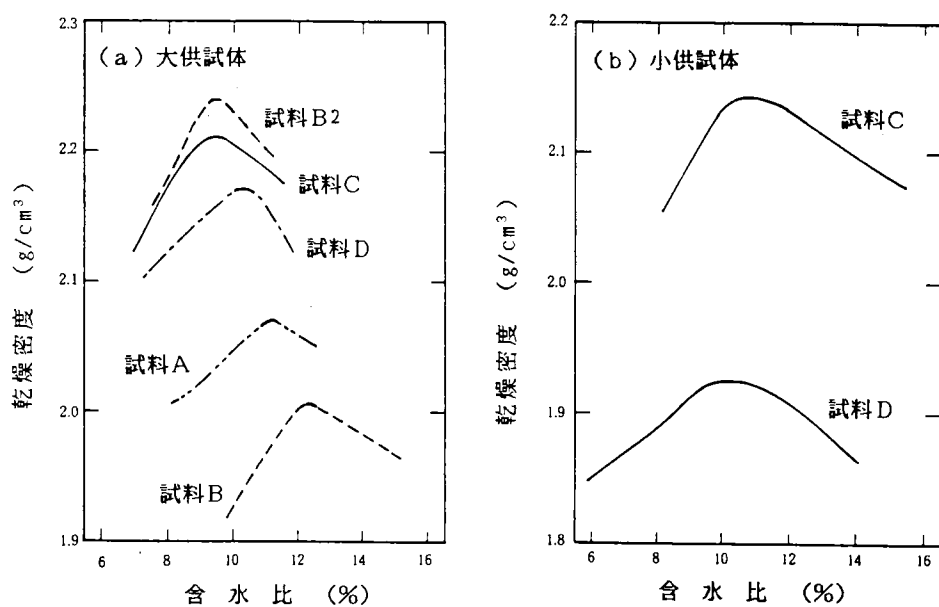


図-4.1.2 水硬性粒度調整スラグの締固め曲線



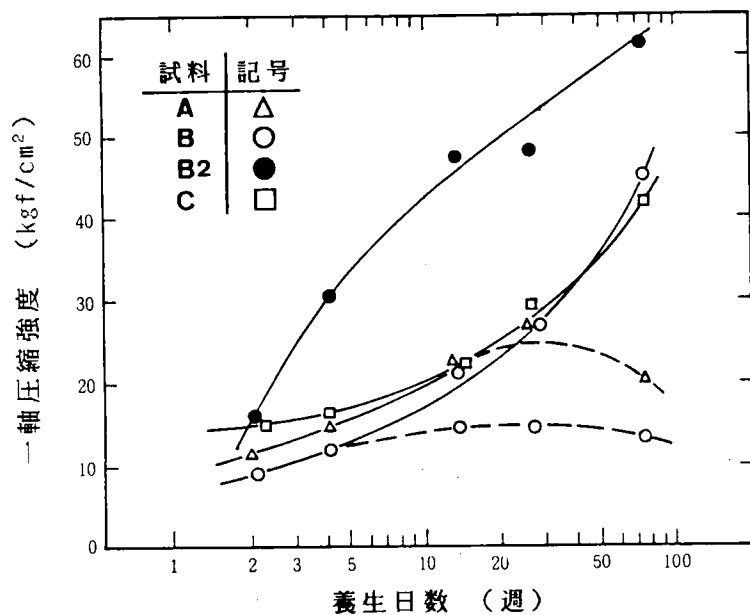


図-4.1.3 養生日数と強度の関係 (試験方法①、大供試体)

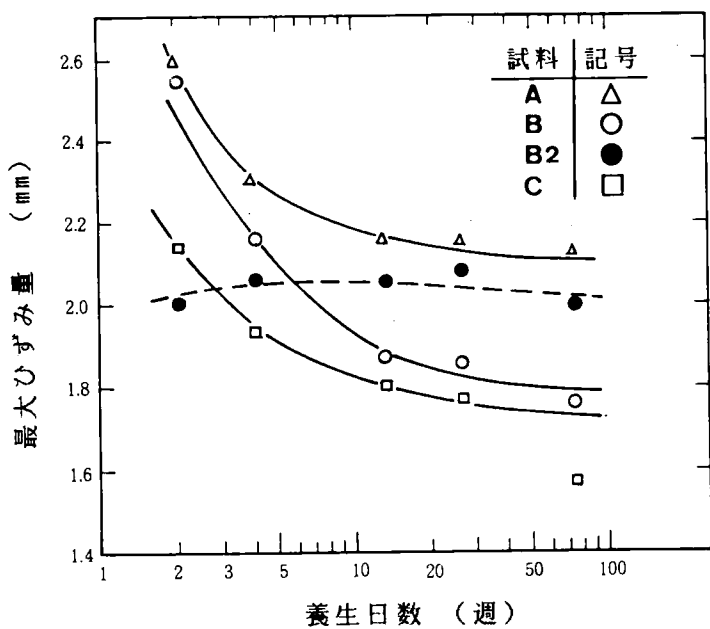


図-4.1.4 養生日数と破壊時の最大ひずみ量の関係  
(試験方法①、大供試体)

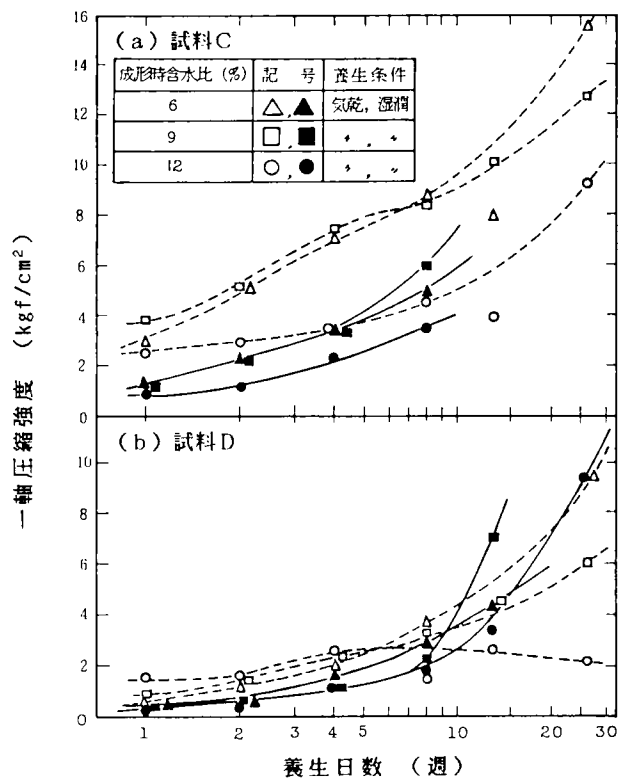


図-4.1.5 養生日数に対する養生方法と強度の関係  
(試験方法②③、小供試体)

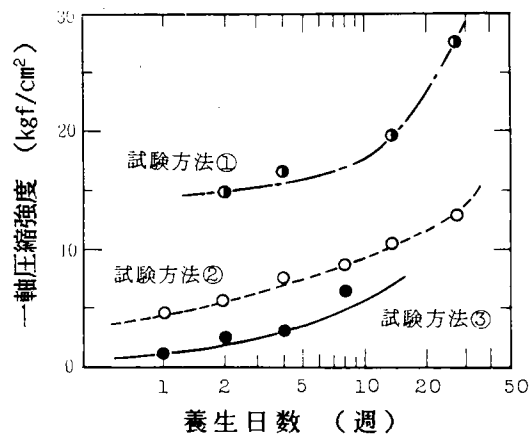


図-4.1.6 養生日数と強度の関係  
(試験方法①②③、試料C、成形時含水比9%)

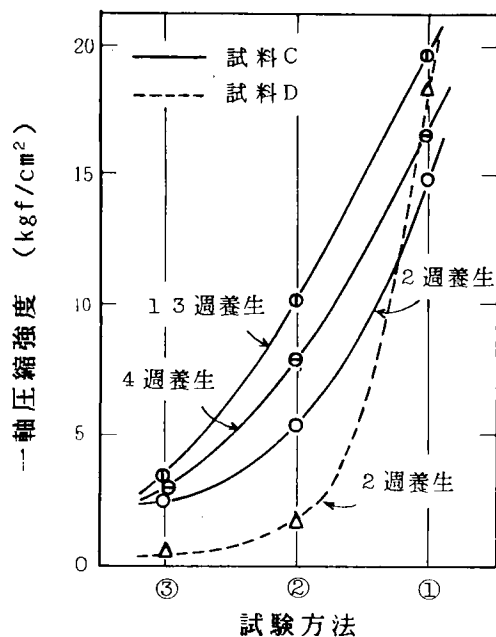


図-4.1.7 供試体の大きさ、試験方法と強度の関係  
(試験方法①②③、試料C、D、成形時含水比9%)

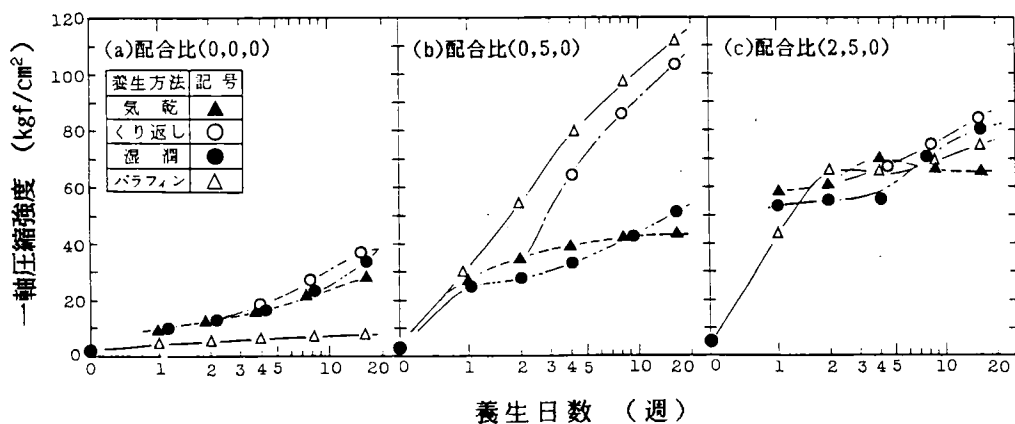


図-4.1.8 養生日数と強度の関係 (試験方法④、試料C)

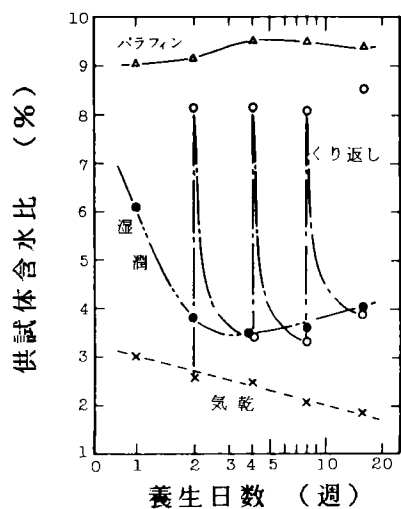


図-4.1.9 養生日数と供試体の含水比の関係（試験方法④、試料C）

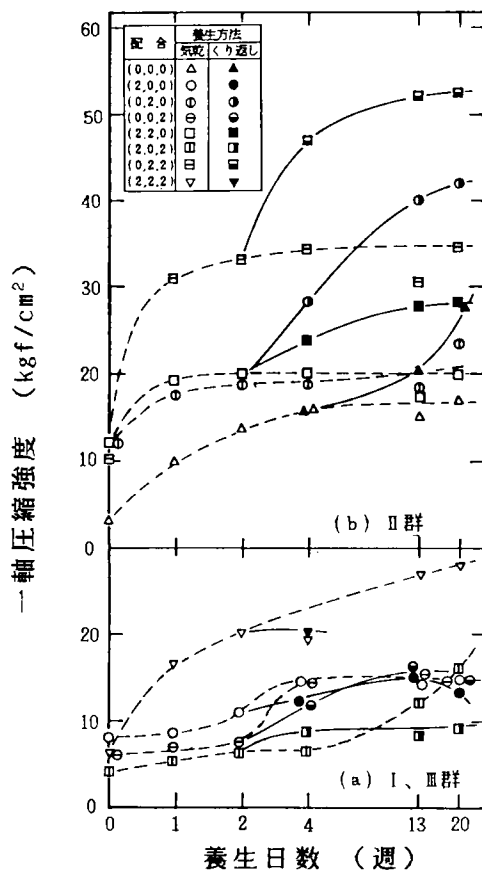


図-4.1.10 養生日数と強度の関係（試験方法⑤、試料C）

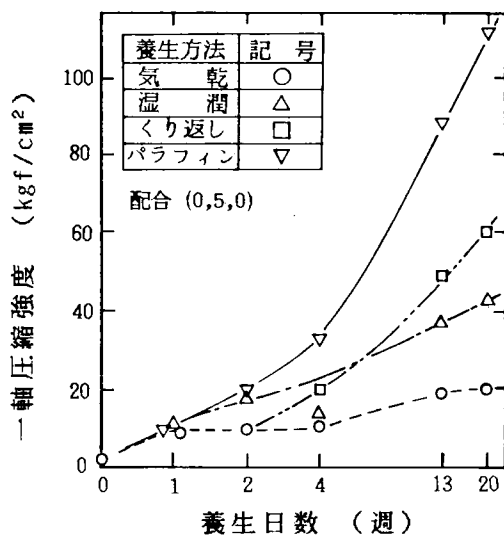


図-4.1.11 養生日数と強度の関係（試験方法④、試料A）

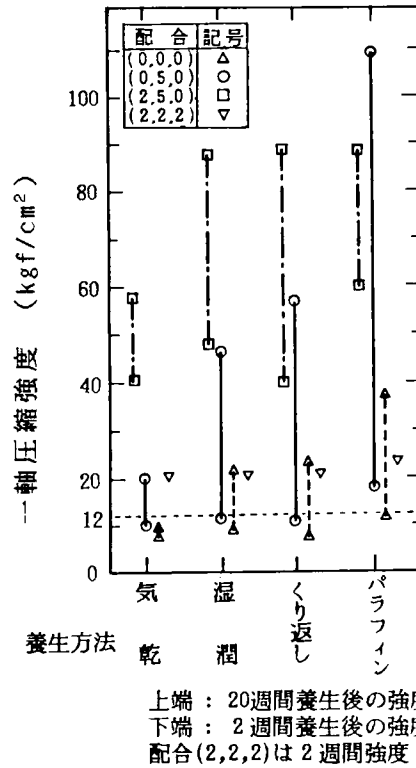


図-4.1.12 養生方法と強度の関係 (試験方法④、試料A)

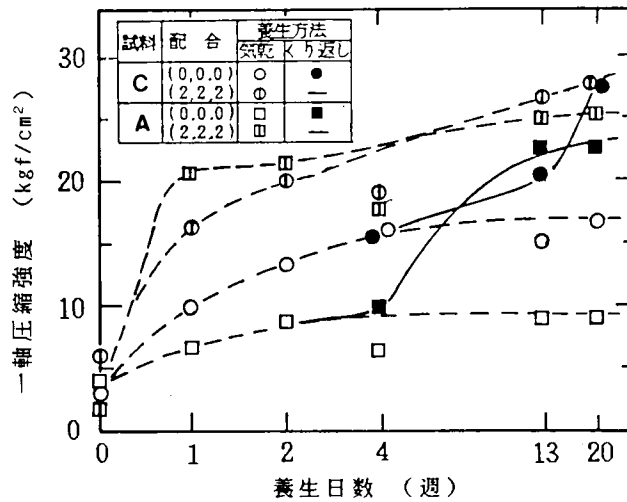


図-4.1.13 養生日数と強度の関係 (試験方法④、試料A、C)

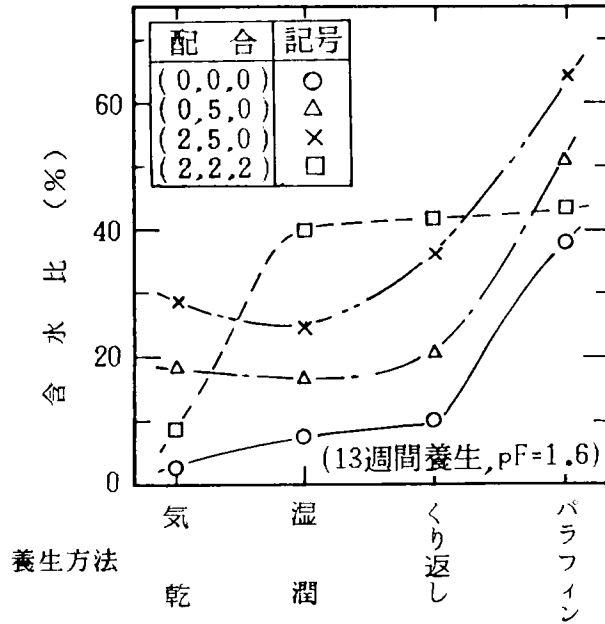


図-4.1.14 養生方法と処理土の保水性  
(試験方法④、試料A、 $pF=1.6$ )

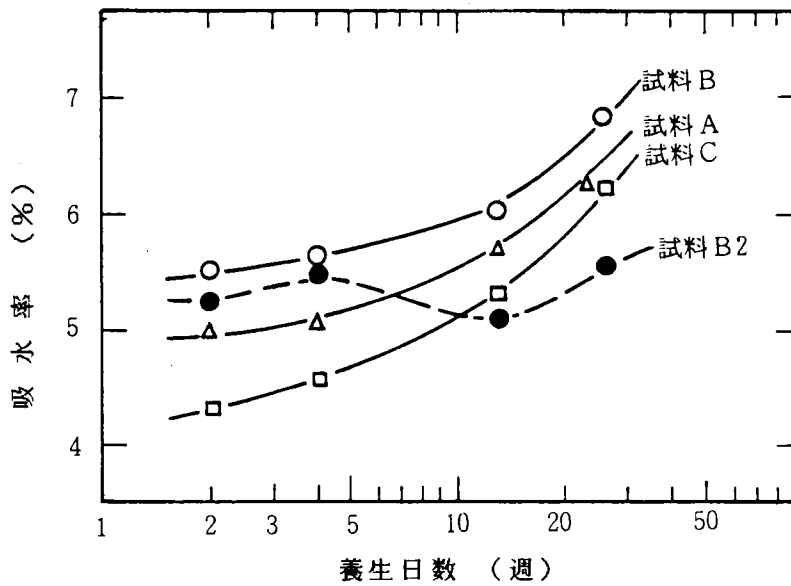


図-4.1.15 養生日数と吸水率の関係 (試験方法①、大供試体)



写真-4.1.1 処理土中の鉄分により  
クラックの生じた供試体

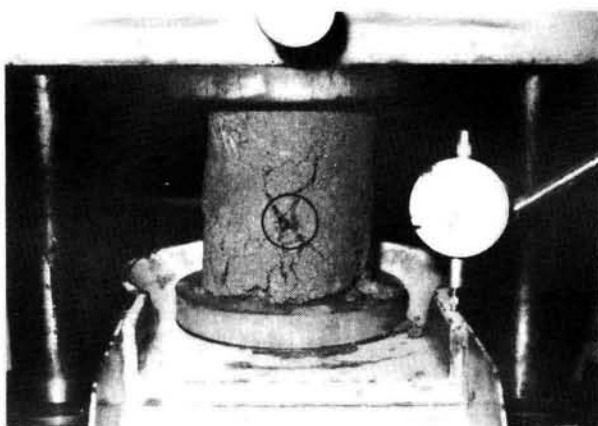


写真-4.1.2 鉄分によりクラックの生じた供試体  
の一軸圧縮試験

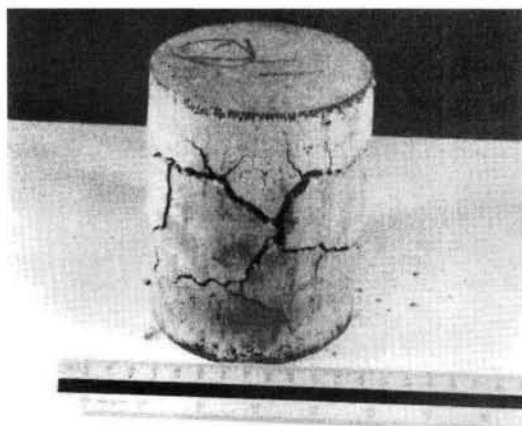


写真-4.1.3 石膏の添加によりクラックの  
生じた供試体

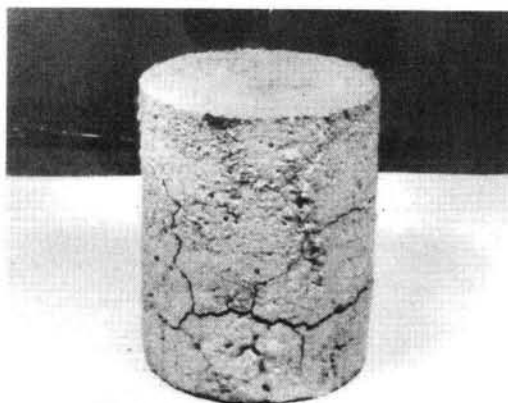


写真-4.1.4 石膏の添加によりクラックの  
生じた供試体

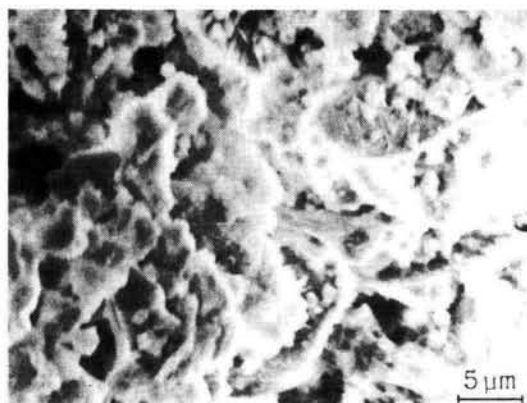


写真-4.1.5 試料CのSEM像(養生前)

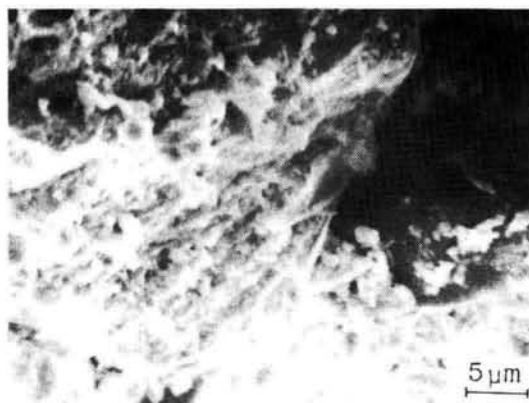


写真-4.1.6 試料CのSEM像  
(気乾養生、1年後)

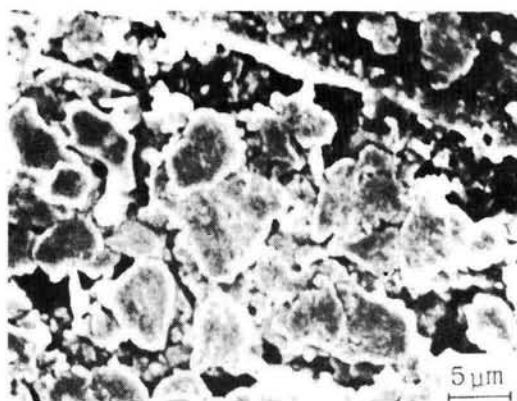


写真-4.1.7 試料CのSEM像  
(湿潤養生、1年後)

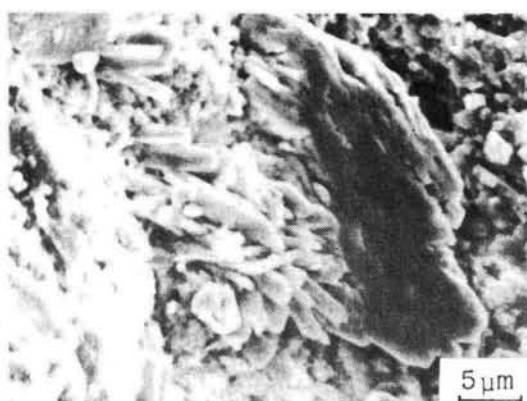


写真-4.1.8 試料CのSEM像  
(くり返し養生、1年後)

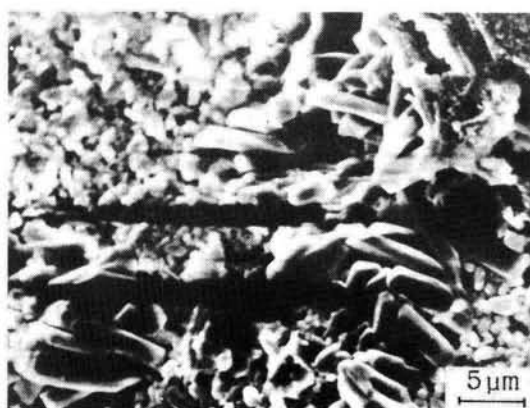


写真-4.1.9 試料B2のSEM像  
(くり返し養生、1年後)



## 4. 2 フライアッシュおよび水砕スラグの石灰・セメント系安定材による

### 固化処理に関する研究

#### 4. 2. 1 概 説

近年、わが国ではエネルギー源の多様化のため火力発電所などの石炭の使用量が飛躍的に増加している。そのため石炭が燃焼した際に得られる石炭灰の発生量も膨大なものとなっている。石炭灰の発生量は使用する石炭の約15～30%の質量であり、1987年の実績では442万トンに達しており、1997年度には一般産業用も含めて約743万トンとなり、1987年度の約1.7倍に増加する見込みである<sup>1)</sup>。

石炭灰の種類は原料炭や燃焼、および集塵方式により種々のものがあるが、採取箇所などの違いによって、クリンカアッシュ、シンダアッシュ、フライアッシュの3種類に分けられる。クリンカアッシュは灰分の10～25%発生し、塊状で燃焼炉の底部に落下したものである。砂程度の粒度で自硬性がないため、砂の代替材料としての可能性が考えられている。そして、灰分の残りの75～90%は燃焼ガスにより炉外に排出され、その中でも節炭器などで沈降する比較的粒径の大きな(約0.1mm以下)シンダアッシュ(約5%)と、電気集塵器で採取される粒径が0.02～0.03mm程度のフライアッシュ(約70～85%)に分けられる<sup>2)</sup>。

フライアッシュの化学成分はシリカ、アルミナが多く、国内炭から得られるものは石灰分が少ないのが特徴である。一方、国外炭からのものは、わが国で通常使用されている歴青炭とは異なり、褐炭や亜歴青炭を使用しているため、石灰やマグネシウム分の多いフライアッシュとなっていることが報告されている<sup>3)</sup>。しかし、どちらのフライアッシュも主成分として50～60%のシリカ分を含有しており、活性ポズランであることに変わりはなく、粒子表面の遊離石灰と燃焼ガスの硫酸成分などとの作用により水硬性をもっている。しかし、その固結程度は微弱なものであり、固化による有効利用を図るには安定材などの添加により硬化反応を活性化し、フライアッシュの潜在水硬性を利用することが必要と考えられる<sup>4)</sup>。また、近年融点の高い国外炭の増加、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$ などの大気汚染防止など環境政策の強化により火力発電所における高炉の燃焼温度が低く規制され、強熱減量の増大など低品質のフライアッシュが発生する傾向にある<sup>5), 6)</sup>。

石炭灰の利用は欧米で盛んであり、路床・路盤材料および路盤改良材として有効に使用されている<sup>7), 8)</sup>。しかしながら、わが国ではセメント混和材やセメント原料に利用されているが、粗粒あるいは低品質の石炭灰を主として全体の約70%は廃棄処分されており、現在までほとんど有効に利用されていない。そこで、今後も多くの発生量が予想される石炭灰の有効利用の研

究は現在各方面で盛んに行われている。特に、鳥居ら<sup>9),10)</sup>はフライアッシュやクリンカアッシュを石灰などで安定処理して土質安定材料や盛土材料としての利用を図り、微視的な見地より強度発現について追究している。また、三木<sup>11)</sup>は盛土材料としてフライアッシュの有効性を報告し、施工時の締固めの重要性を指摘している。これらの多くの研究の成果はフライアッシュが有効なボゾラン材料であり、道路用材や盛土材料としての実用化への可能性を明らかにしているが、現在は強度や耐久性などの施工実験を試験的に行っている段階であり、早期の有効利用技術の確立が望まれている。

一方、水砕スラグは第3章で使用したものであり、その潜在水硬性を利用して現在、有効利用がほぼ軌道に乗っており、処分上の問題は少ないが、将来の需給関係の変化を考慮すると、既存の用途を拡大するとともに、付加価値を高めた新しい利用方法の開発は有意義であると考えられる。

本節では石炭灰の細粒分であるフライアッシュを用い、その固化処理において安定材の種類、成形時の締固めエネルギー、供試体中の含水比および養生期間などと固化特性との関係について検討している。また、フライアッシュの化学成分に関係深いフライアッシュ粒子からの硬化反応性元素の溶出性および硬化反応物の生成過程と強度発現との関係についても合わせて考察している<sup>12),13),14)</sup>。

#### 4. 2. 2 材料特性と実験概要

用いた試料は国内産および国外産の石炭を燃焼した際の副産物である二種類のフライアッシュと粉状の水砕スラグである。

フライアッシュは広島県T発電所産のもので九州の一般炭、三池炭および北海道炭の混合物を燃焼したもの（以後、国内炭と呼ぶ）と、長崎県M発電所の豪州ブレアゾール炭より発生したもの（以後、国外炭と呼ぶ）である。また、水砕スラグは軟質のものを微粉砕したK社製のものである。それらの化学成分、物理的性質、および粒径加積曲線を表-4.2.1、2、図-4.2.1に示す。

フライアッシュはブレン値が国内炭が $3100\text{cm}^2/\text{g}$ 、国外炭が $3280\text{cm}^2/\text{g}$ とほぼ同じ値を示している。また、比重も国内炭が2.10、国外炭が2.05と、ともに小さな値を示しており、ポルトランドセメントなどと比べて非常に軽量の試料であると言える。一方、強熱減量、MB吸着量は国内炭が1.1%、 $0.98\text{mg/g}$ 、また、国外炭は5.1%、 $0.51\text{mg/g}$ となっており、どちらも未燃焼分が多く、フライアッシュの品質としてはあまり良質のものではない。粒度は国外炭フライアッシュは粒径 $75\mu\text{m}$ 以上の粒子が27.1%と粗粒分を多く含んでいるのに対して、国内炭は10.0

%と少なく細粒分の多いことがわかる。そして、60%粒径がどちらも約 $50\mu\text{m}$ 程度であり、フライアッシュとシンダアッシュの混合物程度の試料である。国外炭フライアッシュは均等係数 $U_c$ が6以上で曲率係数 $U_c'$ が $1 < U_c' < 3$ を満たしており比較的粒度分布が良いと言える。しかし、国内炭フライアッシュは均等係数が3.4と小さく、均等粒径で、粒度分布は良いとは言えない。一方、水砕スラグは細かく粉碎したものをを用いており、ブレン値は $3920\text{cm}^2/\text{g}$ とフライアッシュに比べて大きな値を示している。そのため粒度はスラグの約90%が $50\mu\text{m}$ 以下の微細な粒子で構成されており、均等係数と曲率係数より粒度分布は良いと言える。また、粒度分布に基づく土質分類としては、フライアッシュ、スラグともにシルトに分類される。

フライアッシュの化学成分は、国内・国外炭とも $\text{SiO}_2$ と $\text{Al}_2\text{O}_3$ が主成分になっている。しかし、硬化反応に重要な役割を果たす $\text{CaO}$ と $\text{SO}_3$ については豪州炭から発生するフライアッシュは $\text{Ca}$ 分が少ない<sup>15)</sup>と報告されているように本実験で用いた国外炭も大変小さな値になっている。一方、国内炭の $\text{CaO}$ 、 $\text{SO}_3$ の含有量は国外炭に比べ7～10倍の値になっていることが注目される(表-4.2.2)。SEM-EDXA分析(写真-4.2.1, 2)でもその結果を裏づけている。また、水砕スラグは鉄鉱石や石灰石の主成分である $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ や $\text{CaO}$ とともに、製鉄の際の脱硫作用により $\text{SO}_3$ 成分の多いのが特徴である。そのため、水だけとの混合により固化する水硬性を有している。

図-4.2.2に国内炭のフライアッシュ、また、図-4.2.3に国外炭のX線回折結果を示している。いずれも、わずかな $\text{CaO}$ のピークおよびシャープなムライトと石英のピークが見られる。なお、スラグは非晶質でありX線回折において明確なピークは現れない。

フライアッシュのSEM写真を写真-4.2.3～8に、スラグのSEM写真を写真-4.2.9に示している。フライアッシュは国内炭、国外炭とも滑らかな表面をした球状の細粒子の他、不規則な形状をした多孔質の $50\sim 100\mu\text{m}$ 程度の粗粒分を多量に含んでいる。また、球形粒子のうちでも大きなものには、一部が膨れたり、また、へこんで小さな穴のあいた部分の見られるものもある。さらに、大きな穴の開いた中空状になった粒子や、その穴の中により小さな粒子を包含したものも見られた(写真-4.2.7)。一方、水砕スラグはフライアッシュと異なり、ほとんどが鋭角な稜線を持つガラス質の微小な粒子で構成されている(写真-4.2.9)。

次に、フライアッシュに水だけを加えて7日間おいたものが写真-4.2.10～14である。加水のみでも、フライアッシュ粒子の表面からは、トゲ状や短冊状の生成物、あるいは棒状のエトリンサイトなどが発生しており、フライアッシュの水硬性がみられる。これは製造過程において粒子表面に付着した遊離石灰や無水石膏による硬化反応によるものであり、加水だけでもこのような反応物が生成したものである。なお、この短冊状の生成物はSEM-EDXA分析の結果、硫黄が特に多いのが特徴であり、石灰量が相対的に少なくなった場合に生じると言われ

るモノサルフェート水和物であると考えられる（写真－4.2.15）。しかしながら、フライアッシュは硬化反応物の生成量はわずかであり、含有成分としてのカルシウムは少量しか含まれておらず、スラグと異なり加水のみによる固化はあまり期待できない。

安定材は表－4.2.3に示す炭酸アルミネート系塩材料（以下、C A S 材と呼ぶ）を用い、フライアッシュの質量の3、5、8、12%を添加している。成形時の含水比は試料が分離しない程度に流動性をもたせた値であり、国内炭フライアッシュは50%、国外炭は70%、粉末スラグは30%に調整し、土質工学会基準、「安定処理土の締固めをしない供試体作製方法」（JSF E 821）<sup>16)</sup>に準じて供試体の成形を行った。

一方、フライアッシュとスラグを用いた高強度材料としての可能性の追究のためC A S 材とセメント添加量を多くした実験も併せて行っている。

固化処理の配合は表－4.2.4のとおりであり、フライアッシュでは安定材を50～30%の範囲で使用している。また、比較のためC A S 材を用いないセメントだけを40%添加した配合も行っている。また、スラグではC A S 材をスラグの25%添加した場合の実験結果について検討している。

供試体の成形時含水比は流動性のあるものと最適含水比に近い二種類を用いており、含水比が50%（国内炭）と65%（国外炭）の流動性のあるものはC A S 材を添加したものと同様の締固めをしない方法であり、最適含水比に近い30%（国内炭）、35%（国外炭）はJIS A 1210の第一方法と同じエネルギーで締固めた。

いずれの供試体も20℃、90%で所定日数密封養生を行った後、一軸圧縮試験を行っている。

#### 4. 2. 3 石灰・セメント系安定材を添加した水砕スラグおよびフライアッシュの強度特性

##### （1） C A S 材を添加したフライアッシュと水砕スラグの強度特性

フライアッシュ、および水砕スラグの潜在水硬性に着目し、C A S 材を添加した固化特性を調べた。

図－4.2.4にフライアッシュ、および水砕スラグのC A S 材添加率に対する強度を示している。スラグでは3日養生ですでに50kgf/cm<sup>2</sup>以上の大きな初期強度が得られている。これはスラグのブレン値が3920cm<sup>2</sup>/gであり、比表面積の大きさによる硬化活性の高さを示している。一方、安定材で処理されたフライアッシュ（以後、処理灰と呼ぶ）では種類の違いによる固化強度の差が生じている。国内炭フライアッシュを使用した処理灰ではC A S 材の微量の添加により1kgf/cm<sup>2</sup>以上の短期強度が得られ、長期間にわたり強度の増加がみられるのに対し、国

外炭の強度は1 kgf/cm<sup>2</sup>より低く、また、養生に伴う強度増加もみられない。

なお、図-4.2.5はフライアッシュと水砕スラグに水だけを加えて強度を調べたものである。スラグは加水のみによっても3日養生で2 kgf/cm<sup>2</sup>以上の強度を、また28日養生では35kgf/cm<sup>2</sup>程度の強度を得ており、養生初期から長期にわたる大きな強度の伸びを示している。これはスラグの成分中には硬化反応に必要な石灰分が多く含まれているために、水だけの添加でも硬化反応が起こり、いわゆる水硬性を発揮したものである。しかし、C A S材によって、さらに反応に必要な成分を補ってやると、表-4.2.5に見られるようにC A S材3%添加のものでは、強度は3日養生で約24倍、7日養生で約17倍、28日養生で約3倍となっており、C A S材の硬化刺激作用の有効性が見られる。

一方、フライアッシュの場合についてみると、国外炭の場合は1 kgf/cm<sup>2</sup>程度の強度で養生日数が経過してもほとんど強度増加は認められない。このことはC A S材だけを12%まで添加しても安定材を添加した効果がなかったことと同じ結果である。しかし、国内炭の場合は養生日数の経過とともにかなりの強度増加が見られる。このフライアッシュの水硬性はフライアッシュ粒子表面に付着している石灰分によるポゾラン反応などによるものであり<sup>17)</sup>、フライアッシュの種類の違いによる固化特性の差が現れている。表-4.2.6は硬化反応に関係深い元素のフライアッシュ粒子からの溶出試験の結果である。特に、Ca、S成分において国内炭フライアッシュは国外炭を上回っており、硬化反応が顕著であった原因である。

以上の結果、水砕スラグや国内炭の強度発現は硬化反応性の高いCa、SiやS成分を多く含有しており、加水およびC A S材の添加によりポゾラン反応などの硬化反応を刺激したためと考えられる。一方、国外炭ではそれらの反応性元素が少ないため強度の発現がみられなかったものであり、フライアッシュの成分の違いがあげられる。また、もう一つの理由としては含水比の影響が考えられる。図-4.2.6は国外炭フライアッシュにC A S材を添加し、含水比を70%と55%の二とおりに変えて行った結果である。単純な比較はできないものの、含水比の増加による強度低下は明らかであり、成形時含水比の重要性を示している。

## (2) 高強度材料としてのフライアッシュと水砕スラグの強度特性

フライアッシュ、スラグの固化程度を高め、高強度材料としての可能性を追究する。

フライアッシュの安定材としてはC A S材とセメントとを使用し、スラグではC A S材をスラグの25%添加した場合の実験結果について検討している。フライアッシュ、スラグともに締固めをするものと、締固めをしないものの二とおりについて実験している(表-4.2.4)。

処理したフライアッシュの養生日数に伴う強度の変化を図-4.2.7, 8に示す。図-4.2.7は締固めを行っていないもので、図-4.2.8は締固めを行ったものである。フライアッシュは国

内炭、国外炭とも、締固めを行ったもののほうが、大きな強度を示しており、国内炭では養生初期における締固めの効果が顕著である。また、両者ともセメント量が多くなるにつれて締固めによる強度増加が大きくなっている。そして、締固めの有無に関わらず長期にわたる強度増加がみられ、特に、締固めをしていない処理灰でその傾向は顕著となり、フライアッシュの反応性の良さを示している。一方、国内炭と国外炭の強度を比較してみると、すべての場合で国内炭の方が国外炭に比べ大きな強度を示している。

次に、C A S材の添加効果を配合F 6 0とF 6 0 Cで比較してみると、国外炭ではあまりC A S材添加による効果はみられないものの、国内炭ではC A S材を添加したものと添加しないものでは28日養生で大きな強度の違いを示している。この原因はフライアッシュの反応性の違いによるものと考えられる。国内炭は均等粒径のため供試体中の大きな空隙をC A S材によるエトリンガイトなどの大きく成長する反応生成物で埋めた結果、大きな強度増加が得られたものと考えられる。一方、国外炭では供試体中の空隙が小さいため微細なC S H系反応生成物の固化効果により供試体の剛性が高くなったものである。

一方、処理したスラグは、C A S材添加率が3～12%の場合でも大きな強度が得られたが、図-4.2.7, 8に示すようにC A S材添加率が25%の場合ではさらに大きな強度を得ている。締固めを行っていない供試体の内部は全体的に硫化イオンのため緑色に変色し<sup>18)</sup>、締固めを行ったものは突き固めの影響で水が部分的に片寄り、水分の多いところで3層に分かれて緑色に変色し、その他の水分の少ないところでは白色で残っていた。固化の過程で起こるほとんどの反応が水の消費を伴ったものであり、水分量が強度に与える影響も大きく、混合や締固めなどの過程に十分注意する必要がある。

これらの試料の養生日数に伴うp Hの変化を示したものが図-4.2.9, 10である。p H値は試料中に残留するCa(OH)<sub>2</sub>量の指標、つまり反応に関わるカルシウムイオン量を推定できるものである。フライアッシュの混合直後のp H値は、国内炭、国外炭とも安定材の配合に関わらず12.6程度であり、硬化反応が進むにつれてCa<sup>2+</sup>を消費し、28日養生後のp Hは11.5～12.0程度に減少している。一方、スラグではフライアッシュに比べて、混合直後からやや低い値を示しており、養生28日では11.2程度となっている。これは、セメントに比べp Hの低いC A S材の添加率が多いため、混合直後からのp Hが低くなったものであり、養生初期の活発な硬化反応によりCa<sup>2+</sup>を消費し、また、C A S材によりCa(OH)<sub>2</sub>を炭酸化した結果であると考えられる。

#### 4. 2. 4 安定材を添加した水砕スラグおよびフライアッシュの

##### 反応生成物の同定と微視的構造

##### (1) 電子顕微鏡観察およびX線マイクロアナライザーによる反応生成物の検討

スラグにC A S材を添加した配合S Aの7日養生後のS E M写真が写真-4. 2. 16, 17である。添加直後において非常にはっきりしていた粒子の輪郭が不鮮明になっており、粒子間を埋めるように反応物が生成していることがわかる。そして、粒子の表面には少量の針状結晶が、また空隙部分には薄く重なり合った板状結晶が生成している。S E M-E D X A分析によると、CaおよびAlのピークは針状結晶、板状結晶ともに高いが、針状結晶ではSiに対してSのピークが高く、板状結晶ではSiに対してSのピークは低くなっている(写真-4. 2. 18)。その結果、この針状結晶はエトリンガイトであり、板状結晶はスラグの主要な硬化反応生成物である加水ゲーレンガイトかC A H系反応生成物であると考えられる。そして、28日養生になるとスラグの角張った粒子表面が全く見えなくなり、反応生成物によって全体が結合されていることがわかる(写真-4. 2. 19, 20)。そして、C A S材を添加したスラグ(配合S A)の微視的観察では成形時含水比による違いはみられなかった。

次に、国内炭の燃焼により得られたフライアッシュでは、3日養生で反応生成物として非常に多量のエトリンガイトが空隙部に発生しているのがみられる。そして、配合F 5 0について含水比30%のものと50%のものとを比較してみると、30%の方では比較的細いエトリンガイトがみられる(写真-4. 2. 21~24)のに比べ、50%の方では水分が多いために太い棒状のエトリンガイトに成長している(写真-4. 2. 25~27)。そして、養生28日になるとエトリンガイトの針状結晶が相互に結合してネット状の構造を作りだしており、このような硬化反応機構によってフライアッシュ粒子が相互に結合され、緻密な粒子構造が形成されることにより、強度が発現されるものである。また、28日養生のものにはごく一部に写真-4. 2. 28のような六角板状の生成物も見られた。一方、含水比30%の方では28日養生でも針状結晶はあまり発達しておらず、粒子間を埋めているのは主にセメントの水和物である。

また、配合F 7 0(写真-4. 2. 29, 30)も同様に成形時含水比50%の方に多くのエトリンガイトやC S H系反応物の生成しているのが見られ、30%の方ではフライアッシュ粒子の表面に板状結晶が生成しているのが見られる(写真-4. 2. 31)。これは間隙中の水分量によって、フライアッシュ粒子からの反応性イオンの溶出量が左右され、水分量の多い場合は反応性イオンの溶出も多いため高硫酸塩型のエトリンガイトが生成し、水分量の少ない場合は低硫酸塩型のモノサルフェート水和物が生成したものであると考えられる。

一方、配合F 6 0 Cではエトリンガイト以外のC S H系反応生成物と思われる網目状のもの

がフライアッシュの粒子表面を覆っている（写真－4.2.32, 33）。

次に国外炭から得られたフライアッシュの写真を写真－4.2.34～45に示す。写真－4.2.34, 35は配合F 5 0 Wの3日養生のSEM写真である。多量の板状結晶および網目状の結晶が見られるが、針状結晶はまだ小さいようである。28日養生では板状結晶、針状結晶ともに発達して針状結晶が互いに重なり合った網目状構造や板状結晶と針状結晶との共存部が見られるようになる（写真－4.2.36～38）。また写真－4.2.39では、7日養生の写真－4.2.35に比べて、フライアッシュ粒子の表面から多量のC S H系反応物が生成して粒子を完全に覆うとともに、粒子相互を結合している様子が見られる。配合F 5 0 Dでは3日養生で写真－4.2.40, 41のように微細な針状結晶とともに粒子表面から小さな板状結晶が生成しているのが見られる。そして、28日養生（写真－4.2.42, 43）では針状や板状の反応物の成長がみられるが、成形時含水比が65%のものと比べると供試体中の水分量が少ないため反応物の生成量は大変少なくなっている。なお写真－4.2.44は28日養生のものであるが、フライアッシュ粒子の間隙を反応生成物が架橋し、一体化されていく様子が観察できる。また、配合F 6 0 Cでは写真－4.2.45のような針状結晶が見られた。国外炭では国内炭と異なり、空隙には多量の板状結晶が見られるが、整った六角板状をしており、SEM－EDXAの結果とも合わせると、この板状結晶はモノサルフェート水和物やC A H系反応生成物であると思われる。

以上の結果、安定材を添加したフライアッシュの強度発現はセメントの水和により生成されるC S H系反応生成物が全ての安定材の配合に共通して確認できる。そして、国内炭フライアッシュではS成分の含有量や溶出量が特に多いためエトリンガイトの生成が特徴的であり、高い強度発現に貢献しているものと考えられる。一方、国外炭フライアッシュはS成分が少なく、Al成分が多いためC A H系反応生成物やモノサルフェートの板状結晶が多く生成され、強度は高くならなかったものである。また、供試体成形時の含水比の強度への影響として、供試体中の水分量の多い場合はエトリンガイトの生成が盛んであるが、水分量が少なくなるとモノサルフェートの生成が顕著になることがわかった。

## （2） X線回折による反応生成物の検討

図－4.2.11は国内炭フライアッシュ（成形時含水比30%）の各種安定材の配合に対するエトリンガイトのX線回折強度（ $d=9.7\text{\AA}$ ）のピークの高さを示したものである。配合F 5 0と配合F 7 0の加水後3時間経過したものと加水前とを比較すると、顕著な回折強度の増加を示しており、エトリンガイトが混合直後のごく短時間に生成し始めているのがわかる。しかし、一旦増加したエトリンガイト生成量は養生日数の経過に伴い減少しており、その減少量はセメント量の多いものほど大きくなっている。一方、配合F 6 0 Cではエトリンガイト量は養生日



数の経過に関係なくほぼ一定の値になっている。

図-4.2.12は国外炭の場合についてエトリングタイトのX線回折強度を各配合ごとにまとめたものである。養生日数とエトリングタイト量との関係は、配合F50、F60、F70において含水比が35%で成形した試料では国内炭と同様の傾向を示しているが、成形時含水比の高い65%のものではエトリングタイトの減少量は小さく、若干増加しているものもみられる。CAS材を添加していない配合F60Cでは、国内炭および国外炭のいずれの含水比の場合においてもCAS材を添加したものに比べエトリングタイトの生成量は少ない。しかし、強度的にみれば、配合F60Cは配合F70よりもエトリングタイトの生成量は少ないにもかかわらず高い強度になっている。つまり固化強度が単純にエトリングタイトの生成量によって決定されるということではなく、セメントの水和物であるCSH系反応生成物などの影響が大きいものと考えられる。ただ、このCSH系反応生成物については結晶性が非常に悪く、X線回折において明確なピークが現れないため定量的な検討は不可能であった。

また、図-4.2.13は国外炭の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ のX線回折強度を表しているが、エトリングタイト生成量と同様に、含水比の高い処理灰の養生に伴う $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量は増加しているが、低い含水比では減少していることがわかる。

これらの結果、供試体中の水分の存在によりセメントの水和反応が促進し、フライアッシュ粒子からの反応性元素の溶出が良くなり、養生日数の経過に伴うエトリングタイトや $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量が増大したものである。しかし、処理灰は密封養生を行ったため炭酸化などは起こり難く、処理灰中のエトリングタイトの生成量が減少するということは考えられないことである。そして、この現象が安定材添加量の多いものほどその減少量が大きいことから考え、養生の経過に伴いセメントの水和によって生成される $\text{Ca}(\text{OH})_2$ などの生成物が、エトリングタイトの表面を覆うことにより、その回折強度が減少したものと考えられる。

また、図-4.2.14は国内炭と国外炭から得られるフライアッシュについて、反応物のX線回折強度（7日養生）を比較したものである。残存する消石灰の量は両者に差はないが、エトリングタイトの生成量は国外炭に比べて国内炭の方が多く、また、炭酸カルシウムの量は国外炭の方が多かった。このことより、初期養生においてはエトリングタイトによって国内炭の強度発現が卓越し、長期においては炭酸カルシウムの安定化により両者の強度差が縮まっているものと考えられる。

CAS材を用いてスラグを固化処理した配合(SA(D)およびSA(W))のエトリングタイト、加水ゲーレンナイトおよび水酸化カルシウムについて養生日数とX線回折強度を示したものが図-4.2.15である。加水ゲーレンナイトは水砕スラグの主要なボズラン生成物である。成形時含水比が30%のものでは養生日数の経過に伴い、エトリングタイトはわずかに減少しているが、加水

ゲーレナイトのX線回折強度は増加している。しかし、硬化反応性元素の溶出量が大きいと考えられる含水比50%では、フライアッシュと同様、養生日数の経過とともにエトリンガイトと加水ゲーレナイトの回折強度は弱くなっており、他の反応生成物により処理灰表面が覆われたものと考えられる。

#### 4. 2. 5 石灰・セメント系安定材によるフライアッシュの強度発現の定式化と最適処理条件の推定

表-4.2.7は処理したフライアッシュの一軸圧縮試験の結果を供試体の養生日数(X)と強度(Y)の関係について、2章2.2の5種類の回帰式にあてはめた結果である。

ここで回帰に用いたデータは3, 7, 28の養生日数について、それぞれ2~3個の強度試験の結果である。相関係数が高く最も適合している回帰式を選択すると、安定材無添加のものでも養生に伴う強度の増加がみられ、相関係数が高く、最も適合している回帰式は、国内炭フライアッシュが式(1)、式(3)であり、国外炭は式(5)である。これはフライアッシュの硬化活性の違いが原因であり、表-4.2.1および表-4.2.6に示したようにフライアッシュは他の廃棄物に比べ、S、CaおよびAl成分を多く含有しており、特に、国内炭フライアッシュの含有量が大きな値になっているためである。

一方、安定材を添加したものでは、配合記号の末尾がDの締固めた処理灰は粒子間隙が小さいためセメントおよびC A S材を併用したセメントのいずれも養生初期の少量の硬化反応物で大きな強度が得られ、その後の強度増加は養生初期に比べると小さいため式(5)の適合性がよい。しかし、配合記号の末尾がWの粒子間隙の大きな、締固めを行っていない処理灰は硬化反応物の生成量が少ない養生初期の強度発現は小さく、長期にわたり生成された硬化反応物が処理灰の粒子間隙を埋め、徐々に強度の増加がみられる。その結果、フライアッシュの反応性の高い国内炭で式(4)、式(1)が、また、反応性の低い国外炭でも式(5)、式(4)が適合したものである。

次に、安定材の種類から定式化を考えると、安定材の添加率が40%と多量の場合、セメントは養生初期に高強度となり、式(5)の適合性がよい。一方、硬化反応性が高いと考えられるC A S材はエトリンガイトが数100kgf/cm<sup>2</sup>の高強度に貢献できないためかセメントだけの添加に比べ、養生初期の強度発現は小さくなっている。そして、処理灰を締固めた場合は式(5)が、また、締固めない場合は式(4)や式(1)が適している。

ここで、それぞれの固化効果の比較を行うために、多くの配合に共通している回帰式(5)を用いて回帰係数を示したものが図-4.2.16, 17である。安定材の配合による比較ではセメント

だけを添加した配合 F 6 0 C は処理灰の締固めの程度やフライアッシュの反応性の違いにより回帰係数 A 値が異なっており、養生初期の強度発現の違いを生じている。しかし、長期養生の終局強度  $1/B$  は締固めたものが約  $450\text{kgf/cm}^2$ 、締固めないものでは約  $270\text{kgf/cm}^2$  になり、フライアッシュの種類に関係なく締固めの程度だけが影響している（図-4.2.18）。一方、C A S 材を添加したものでは添加量の増加に従い、また、フライアッシュの硬化活性に応じて回帰係数は A 値、B 値とも減少する傾向にあり、処理灰の強度が養生初期から長期にかけて増加していることを示している。

図-4.2.17はフライアッシュの種類と成形時含水比に対する回帰係数である。回帰係数 A、B 値は国外炭に比べ国内炭が、また、締固めない処理灰より締固めたものが小さくなっており養生初期から長期にわたる強度が大きくなることを示している。また、国内炭フライアッシュの係数 B 値は国外炭に比べ約  $1/2$  になっており、国内炭の長期強度は国外炭の約 2 倍程度になっていることがわかる。図-4.2.19, 20は処理した国内炭の締固めを行ったものと行わなかったものの養生日数と強度との関係を式(5)で示したものである。いずれも C A S 材を添加したものは長期養生にわたる強度の伸びがみられ、石灰分とフライアッシュの硬化反応が継続されていることがわかる。一方、セメントだけを添加した処理灰は養生初期の強度の増加が大きく、長期養生の強度の伸びは小さくなっている。そして、締固めを行った処理灰の強度に比べ、締固めを行っていない処理灰の強度の低下率は C A S 材を使用したものに比べ、大変大きくなっている。

以上の結果、フライアッシュのような S、Ca および Al 成分を多く含有し、反応性の高い細粒分の多い処理対象試料の強度発現の定式化において、処理対象試料および安定材の硬化反応性と処理灰の締固めの程度、すなわち処理灰の粒子間隙の程度が回帰式の決定に関係深いことが明らかになった。

#### 4. 2. 6 本節のまとめ

本節では、将来その排出量の増加が予測されている石炭灰中のフライアッシュと高炉水砕スラグの固化による有効利用の可能性について検討した。スラグについてはすでに各種の研究がなされており、有効利用の技術はほぼ軌道に乗っていると言えるが、フライアッシュについては現在それほどの実績がなく、特に、今回用いたフライアッシュのようなあまり良質でないものについては、ほとんど利用されていないというのが現状である。今後、原料炭の海外への依存が増加し、石炭灰の品質の低下が予想されており、また、強度特性だけでなく水浸や凍結融解に対する耐久性などの問題も残されており、今後もお一層の研究が必要と思われる。

得られた結果をまとめると次のとおりである。

- (1) フライアッシュはスラグなどに比べ、非常に比重が小さく軽量の試料であり、原材料や製造方法により強熱減量、MB吸着量、粒度分布など物理的、化学的性質に大きな相違がみられる。
- (2) フライアッシュの微視的構造は、球形の細粒分、および不定形で空隙の多い粗粒分とから成り、スラグはガラス質の角張った小さな粒子からなっている。
- (3) フライアッシュは製造過程で粒子の表面に遊離石灰や、硫酸イオンと結合した無水石膏を付着する。その遊離石灰や無水石膏の含有量に応じてフライアッシュの硬化活性は決定され、含有量の多いフライアッシュは水硬性を発揮する。
- (4) スラグは加水のみによって固化する水硬性を有しているがC A S材を添加することにより、固化強度は飛躍的に増大する。一方、フライアッシュではC A S材だけの少量の添加ではフライアッシュの種類による硬化活性の違いにより強度発現に差がみられた。
- (5) 強度増加に貢献する反応生成物はC S H系反応生成物、およびエトリンガイトであり、エトリンガイトの生成量や大きさなどは、他の条件が一定であれば水分量が多いほど増大する傾向にある。
- (6) フライアッシュの化学成分や、その溶出性により硬化反応生成物は異なる。S成分が多い処理した国内炭フライアッシュはエトリンガイトの生成が顕著であり、高い強度発現に貢献している。一方、国外炭フライアッシュはS成分が少なく、Al成分が多いためC A H系反応生成物やモノサルフェートの板状結晶が多く、強度はあまり高くない。また、供試体中の水分量の多い場合は高硫酸塩型のエトリンガイトの生成やその成長が盛んであるが、水分量の少ない場合は低硫酸塩型のモノサルフェート水和物が生成しやすくなる。
- (7) セメントとC A S材を併用した安定材は硬化反応性が大きく、締固めを行わない低密度の状態のフライアッシュの強度発現も大きくなり、利用形態として、高含水比(60～65%)のフライアッシュを注入材や充填材として用いることが可能である。また、安定材としてセメントを単独に用いたものでは締固めを行わない処理灰の強度は締固めを行ったものの強度に比べ強度低下が大きく、安定処理灰施工時の締固めが重要である。
- (8) 石灰・セメント系安定材を添加したフライアッシュのようなS、CaおよびAl成分を多く含有し、反応性の高い細粒分の多い処理対象試料の強度発現は締固めの程度により二つの回帰式で表される。

締固めた処理灰は粒子間隙が小さく、養生初期に生成される硬化反応物で大きな強度になり、その後の強度増加は養生初期に比べると小さいため次の回帰式(5)の適合性がよい。

$$Y = \frac{X}{A + B X} \quad (5)$$

一方、成形時含水比の大きな締固めていない処理灰は養生初期の少量の反応生成物での強度発現は小さく、長期にわたる硬化反応物の生成により徐々に強度の増加がみられるため次の式(4)が最も適している。

$$Y = A X^B \quad (4)$$

- (9) フライアッシュにセメントを単独で使用した処理灰は、締固めの程度やフライアッシュの反応性の違いにより養生初期の強度発現に違いを生じるが、添加率が40%と多量の場合、セメントは養生初期の高強度への発現が顕著であり、式(5)の適合性がよい。そして、長期養生の推定強度はフライアッシュの種類に関係なく締固めの程度だけが影響している。
- (10) フライアッシュに安定材としてセメントとC A S材を併用した処理灰は安定材の添加量に応じて高強度になるが、硬化活性の高いフライアッシュを締固めると式(5)の回帰係数B値はほぼ同じになり、少ない安定材添加量でも高い固化効果が得られる。

## 参 考 文 献

- 1) 日本フライアッシュ協会：パンフレット「石炭灰」、1988.
- 2) 五十嵐和彦：石炭灰の路盤工への利用、土木施工、Vol. 27, No. 15, pp. 166～173, 1986.
- 3) 須長誠、山田幹雄、佐野博昭、家田仁：石炭灰（火力発電所副産物）の土構造物への利用概況と今後の展望、日本鉄道施設協会誌、No. 3, pp. 43～46, 1988.
- 4) S. Diamond : The Utilization of Flyash , Cement and Concrete Research , Vol. 14, pp. 455～462, 1984.
- 5) 大槻光雄、本條忠應、三浦光夫、小松裕幸：最近のフライアッシュの性状、セメント・コンクリート、No. 443, pp. 43～49, 1984.
- 6) 長瀧重義、大賀宏行、嶋田久俊、矢島典明：各種フライアッシュの品質とコンクリートの流動性、セメント・コンクリート、No. 472, pp. 13～19, 1986.
- 7) 水江征捷：石炭火力の灰の有効利用および灰捨処理、土木学会誌、Vol. 66, No. 10, pp. 59～62, 1981.
- 8) R. E. Terrel et al : Soil Stabilization in Pavement Structures a User's Manual Vol. 2 Mixture Design Considerations, U.S Department of transportation, 1979.
- 9) 鳥居和之、川村満紀、榎場重正：締め固めた石炭灰における反応生成物と強度に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、No. 372, pp. 65～74, 1986.
- 10) 鳥居和之、川村満紀：路盤・盛土材料としての締め固めたフライアッシュ、土と基礎、Vol. 37, No. 2, pp. 67～72, 1989.
- 11) 三木五三郎：石炭灰による土地造成の問題点、材料、Vol. 19, No. 205, pp. 64～68, 1970.
- 12) Kamon, M.、Tomohisa, S. and Tsubouchi, K. : The Utilization of Various Waste Materials by Cement Hardening、Review of the 41st General Meeting, Technical Session, The Cement Association of Japan , pp. 84～87, 1987.
- 13) 嘉門雅史、友久誠司、壺内賢一、S. Nontananandh：廃棄物のセメント系固化材による有効利用について、第22回土質工学研究発表会概要集、pp. 1879～1880, 1987.
- 14) 嘉門雅史、澤孝平、友久誠司：フライアッシュとコンクリート微粉末の固化による有効利用について、第42回土木学会年次学術講演会概要集第3部、pp. 776～777, 1987.
- 15) J. Beretka et al : Properties and Pozzolan Behaviour of Australian Fly Ash, Journal of Australian Ceramic Society, Vol. 12, No. 1, pp. 13～19, 1975.
- 16) 土質工学会、土質試験基準検討委員会：安定処理土の締め固めをしない供試体作製方法、土と基礎、Vol. 37, No. 1, pp. 77～78, 1989.

- 17) Y.S.Chae et al : Vibratory Compaction of Fly Ash, Proc. Conf. on Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials, pp.41~62, 1977.
- 18) 野村高照、榎戸恒夫、鈴木章平、徳永良邦、稲山邦彦：高炉水砕スラグの硬化特性とその抑制策、製鉄研究、新日本製鐵（株）、No.301, p.p.19~28, 1980.

表-4.2.1 フライアッシュおよび水砕スラグの化学成分

試料の種類	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
フライアッシュ（国内炭）	49.3	22.0	5.4	1.1	1.2	1.2	4.4	2.0	0.7
フライアッシュ（国外炭）	56.9	32.7	0.5	0.3	1.7	0.1	1.7	1.1	0.1未満
水 砕 ス ラ グ	33.2	14.5	41.8	5.0	1.4	—	1.8	—	2.3

表-4.2.2 フライアッシュおよび水砕スラグの物理的性質

試 料 の 種 類		フライアッシュ （国内炭）	フライアッシュ （国外炭）	ス ラ グ （粉末）
比 重		2.10	2.05	2.85
強 熱 減 量 （％）		1.1	5.1	—
粉末度（ブレン値）（cm <sup>2</sup> /g）		3100	3280	3920
MB吸着量（mg/g）		0.98	0.51	—
粒 度 分 析	砂分（75μm以上）（％）	10.0	27.1	1.9
	シルト分（5～75μm）（％）	88.3	67.3	85.7
	粘土分（5μm以下）（％）	1.7	5.6	12.4
	D <sub>60</sub> （mm）	0.0478	0.0501	0.0266
	D <sub>30</sub> （mm）	0.0287	0.0195	0.0112
	D <sub>10</sub> （mm）	0.0139	0.0074	0.0044
	均等係数 U <sub>c</sub>	3.4	6.7	6.0
	曲率係数 U <sub>c</sub> '	1.24	1.02	1.08

表-4.2.3 安定材の配合（％）

固化処理対象試料	セメント	消石灰	硫酸アルミニウム	炭酸ナトリウム
フライアッシュ	40	25	25	10
水砕スラグ	40	20	25	15



表－4.2.4 固化処理灰の配合と成形時含水比

処理対象試料	配合記号	配 合 比 (％)			成形時含水比 (％)
		処理対象試料	セメント	C A S 材	
フライアッシュ	F 5 0 D	5 0	4 0	1 0	国内炭は 3 0
	F 6 0 D	6 0	3 0	1 0	
	F 6 0 C D	6 0	4 0	——	国外炭は 3 5
	F 7 0 D	7 0	2 0	1 0	
水 碎 ス ラ グ	S A D	8 0	——	2 0	3 0

注) 配合記号の末尾の D の代わりに W の付いたものは成形時含水比が国内炭と水碎スラグは50%、国外炭は55%を示す。

表－4.2.5 C A S 材を添加した水碎スラグの強度増加率 (単位: 倍)

養生日数	C A S 材添加率			
	3 %	5 %	8 %	1 2 %
3 日	2 3 . 8	——	2 9 . 7	7 . 6
7 日	1 6 . 7	——	1 9 . 9	2 1 . 6
2 8 日	3 . 3	2 . 7	4 . 4	6 . 9

表－4.2.6 フライアッシュの溶出試験結果 (mg/l)

フライアッシュの種類	分析時期	C a	A l	S i	S
国 内 炭	加水直後	71	0.5未満	1未満	160
	加水 7 日後	75	0.5未満	1.1	170
国 外 炭	加水直後	33	0.96	0.36	21
	加水 7 日後	52	1.2	2.7	25

表-4.2.7 固化処理したフライアッシュの配合と適合回帰式

フライアッシュの種類	配合記号	成形時含水比 (%)	適合回帰式番号 (相関係数0.9以上)	最適回帰式(5)式		終局強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
				回帰係数A	回帰係数B	
国内炭	無添加	30	3, 1, 4, 2	1.779	0.009	112
	F50D		5	0.011	0.002	483
	F60D		5, 2, 4, 1, 3	0.014	0.002	455
	F70D		5, 2, 1, 4, 3	0.026	0.003	379
	F60CD	50	5, 2, 4, 1, 3	0.007	0.002	452
	無添加		1, 3, 4, 2	4.124	0.064	15.6
	F50W		4, 3, 5, 1, 2	0.022	0.002	540
	F60W		1, 4, 2, 3, 5	0.031	0.002	598
国外炭	F70W	35	4, 1, 5, 2, 3	0.050	0.003	383
	F60CW		5, 2, 4, 1, 3	0.022	0.004	273
	無添加		5, 2, 4	0.760	0.662	1.51
	F50D		5, 1, 4, 2, 3	0.023	0.003	365
	F60D	65	5, 3, 1, 4, 2	0.024	0.004	282
	F70D		1, 4, 5, 2, 3	0.056	0.006	161
	F60CD		5	0.004	0.002	475
	無添加		5, 1, 3, 4, 2	0.035	0.925	1.08
	F50W		2, 5, 4, 1, 3	0.043	0.004	248
	F60W		4, 1, 5, 2, 3	0.069	0.003	315
	F70W		4, 1, 5, 2, 3	0.056	0.003	289
	F60CW		2, 5, 4, 1, 3	0.062	0.004	277

(注) 回帰式番号

- (1)  $Y = A + B X$   
(2)  $Y = A + B \cdot \log X$   
(3)  $Y = A \cdot 10^{BX}$   
(4)  $Y = A X^B$   
(5)  $Y = \frac{X}{A + B X}$

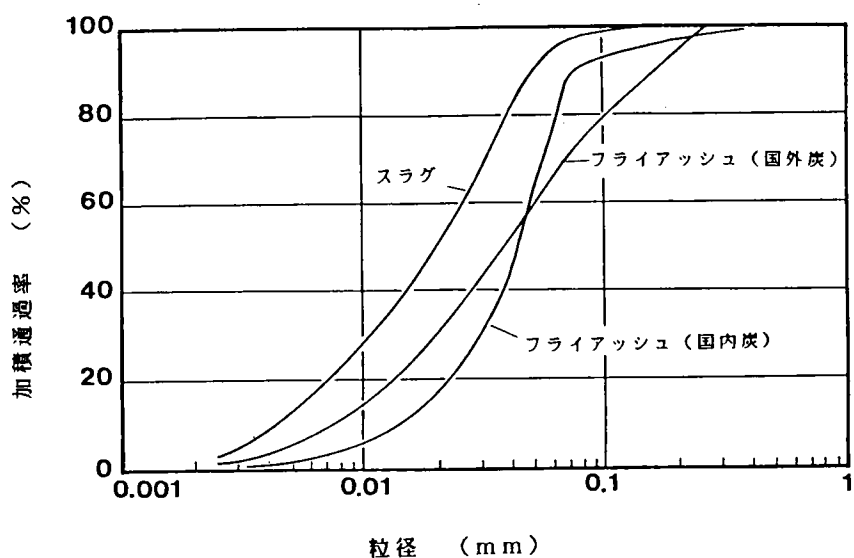


図-4.2.1 フライアッシュと水砕スラグの粒径加積曲線

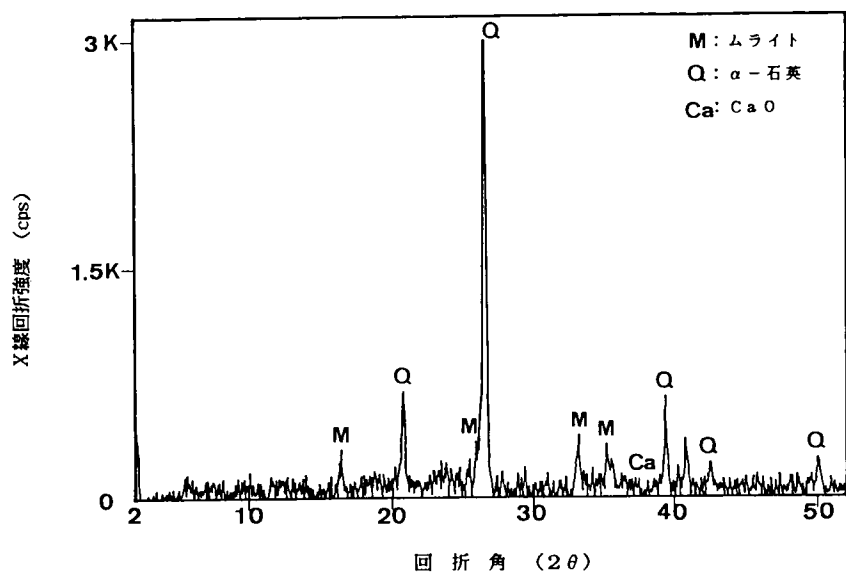


図-4.2.2 フライアッシュのX線回折結果 (国内炭)

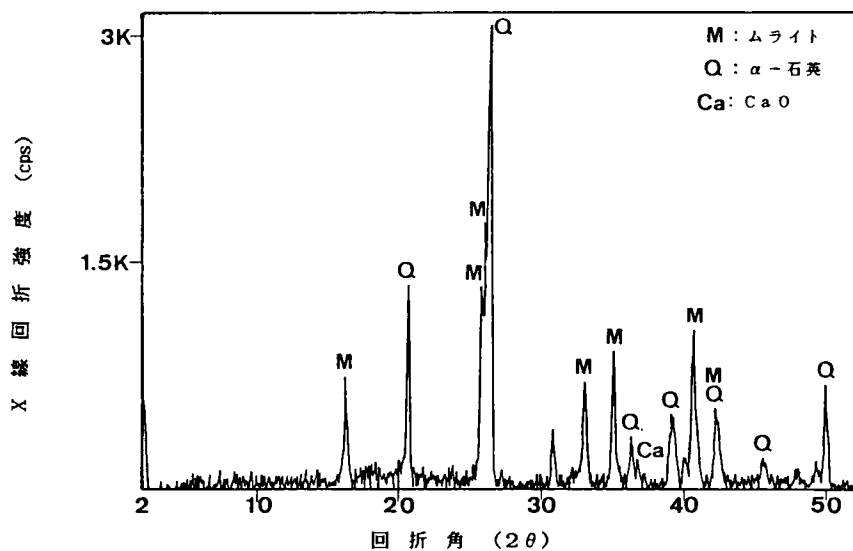


図-4.2.3 フライアッシュのX線回折結果(国外炭)

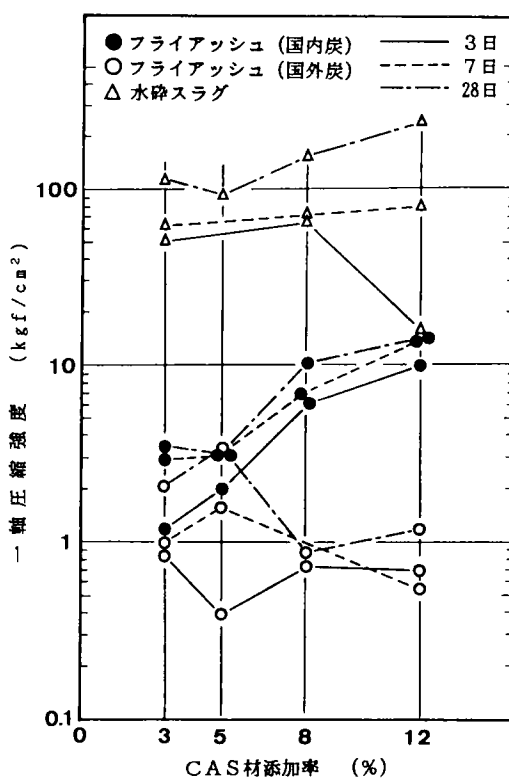


図-4.2.4 CAS材添加率と強度の関係

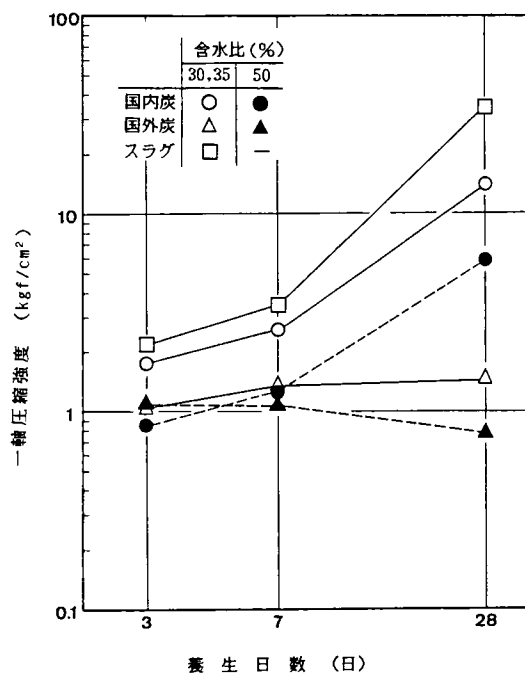


図-4.2.5 加水処理灰の養生日数と強度の関係

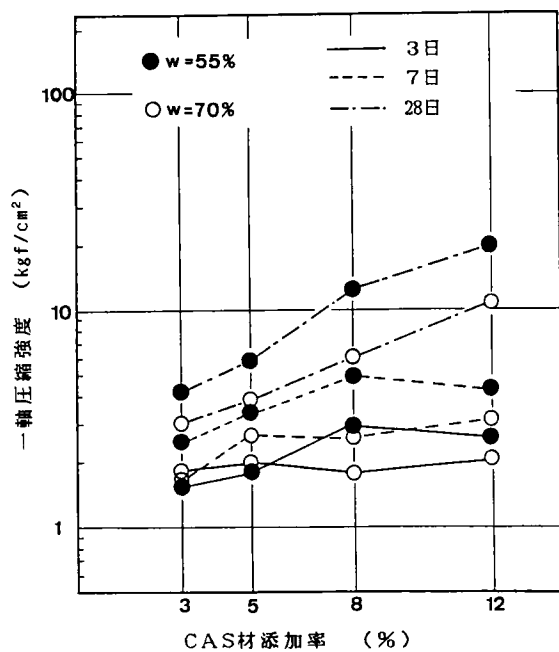


図-4.2.6 含水比の違いによるCAS材添加率と強度の関係 (国外炭)

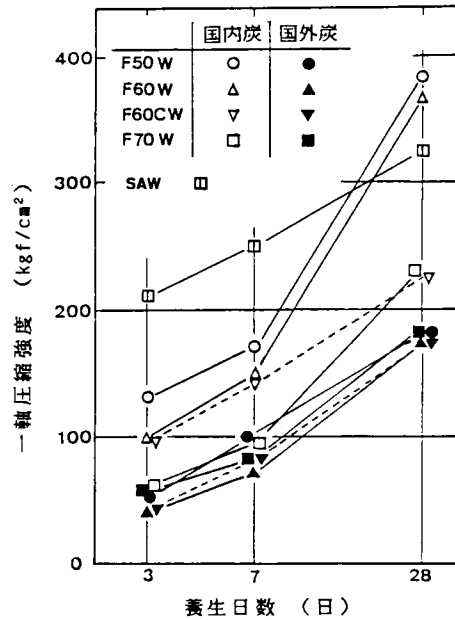


図-4.2.7 締固めを行わない処理灰とスラグの強度変化

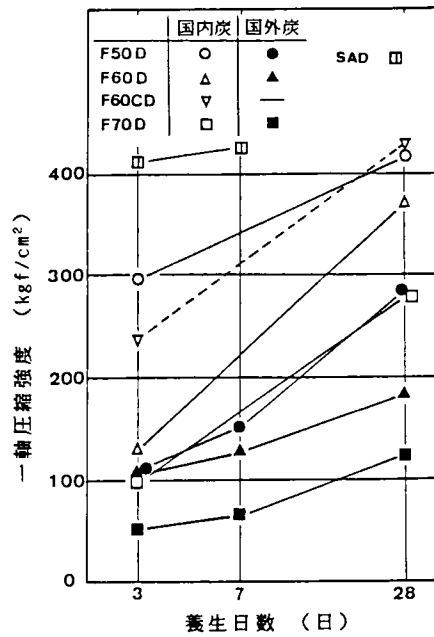


図-4.2.8 締固めた処理灰とスラグの強度変化

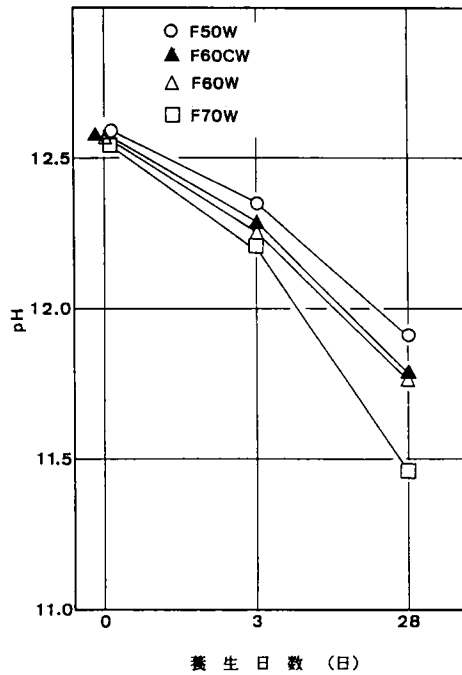


図-4.2.9 養生日数と処理灰のpHの関係（国内炭）

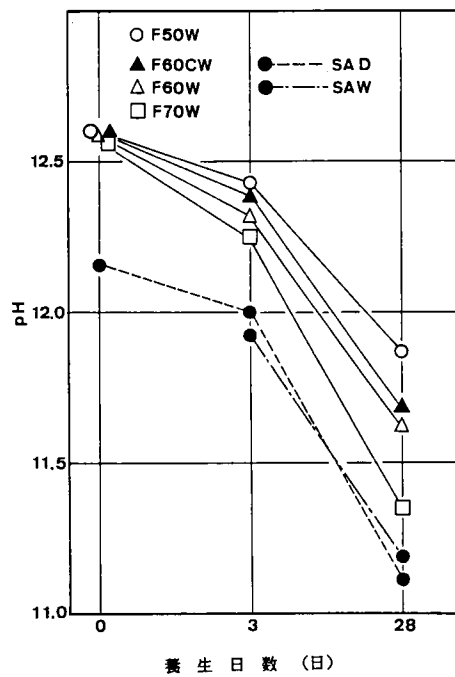


図-4.2.10 養生日数と処理灰のpHの関係（国外炭、スラグ）

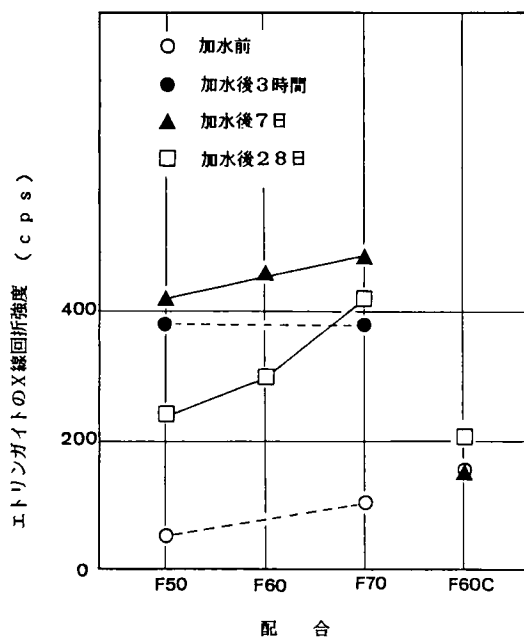


図-4.2.11 安定材の配合とエトリングアイトのX線回折強度 (国内炭)

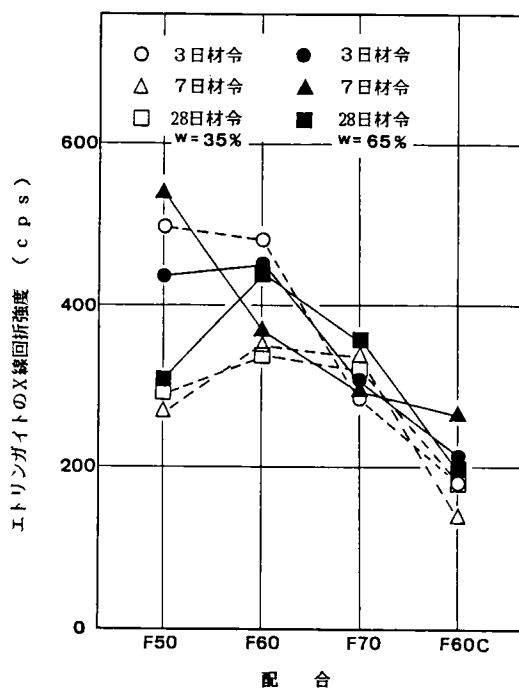


図-4.2.12 安定材の配合とエトリングアイトのX線回折強度 (国外炭)



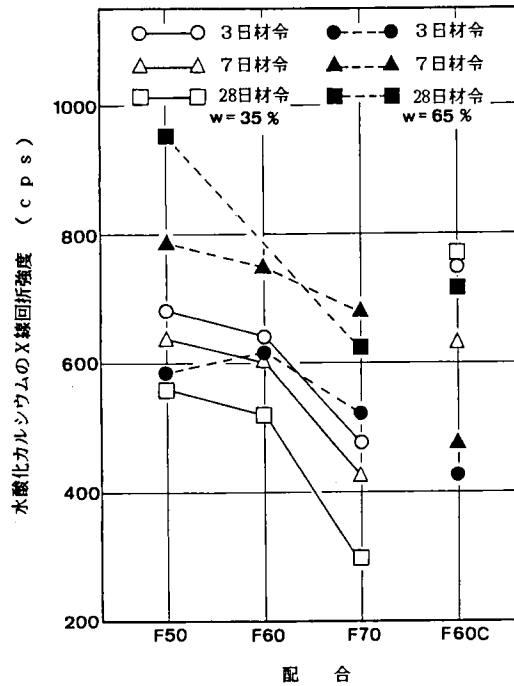


図-4.2.13 安定材の配合と水酸化カルシウムのX線回折強度 (国外炭)

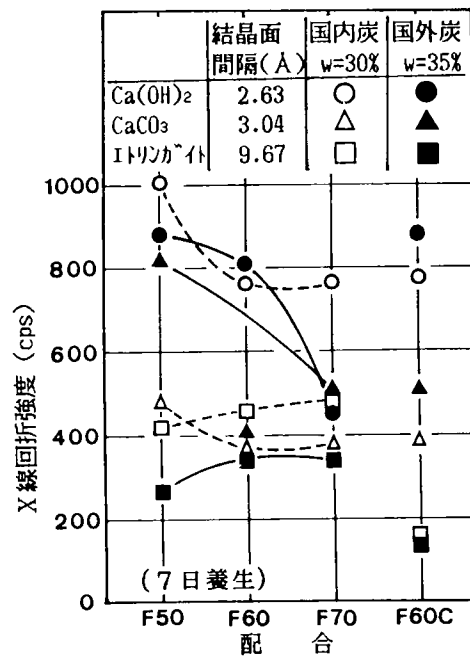


図-4.2.14 安定材の配合と反応生成物のX線回折強度

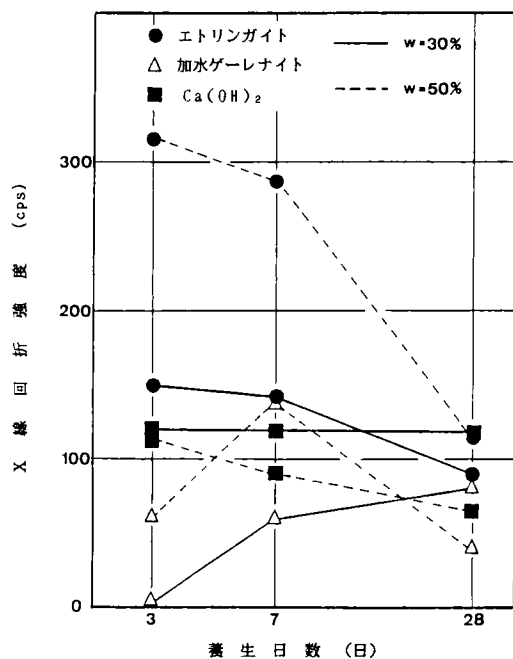


図-4.2.15 固化処理したスラグの反応生成物のX線回折強度

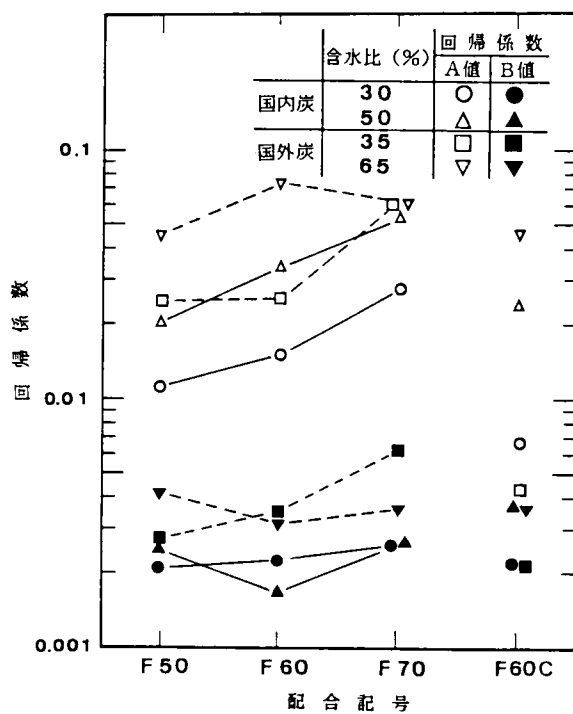


図-4.2.16 安定材の種類と回帰係数の関係 (回帰式(5))

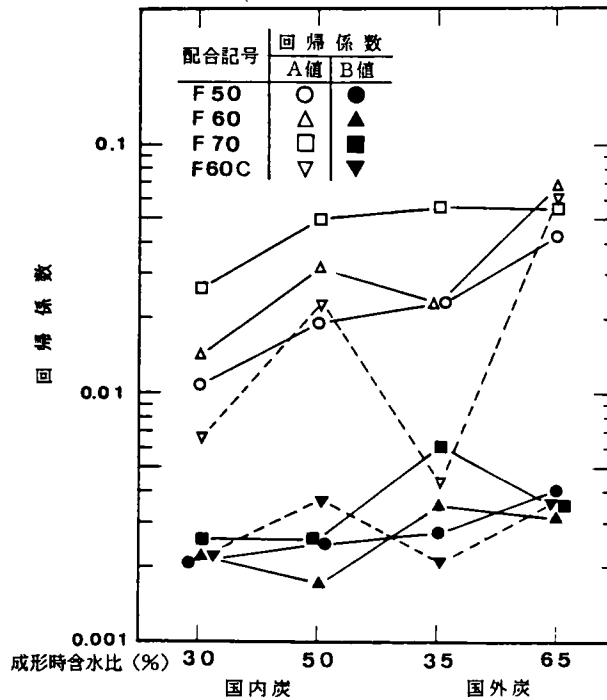


図-4.2.17 フライアッシュの種類および成形時含水比と回帰係数の関係 (回帰式(5))

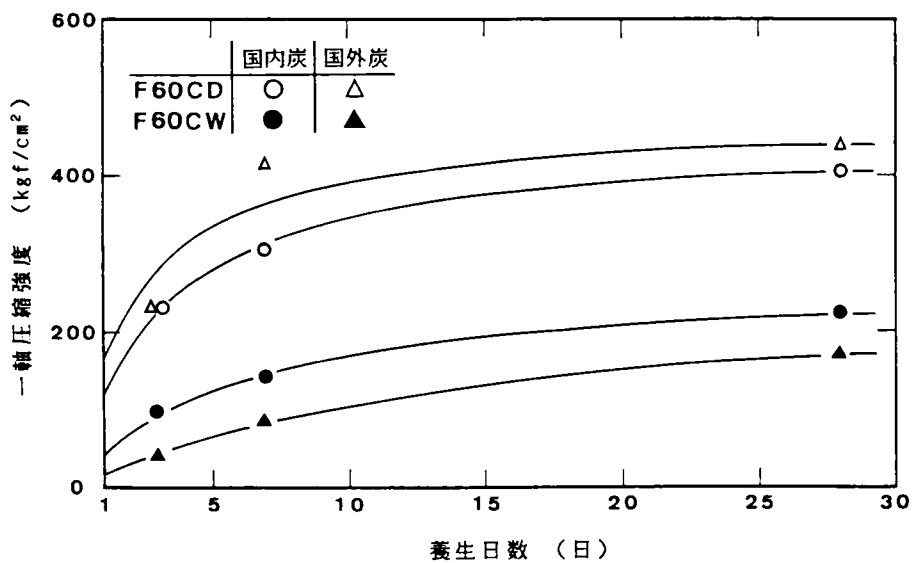


図-4.2.18 固化処理したフライアッシュの養生日数と強度の関係 (回帰式(5))

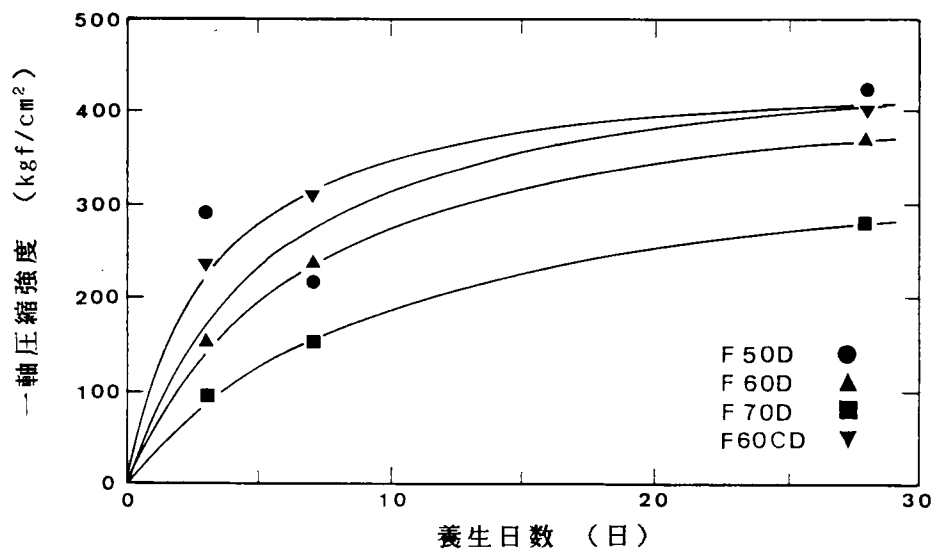


図-4.2.19 固化処理したフライアッシュの養生日数と強度の関係  
(国内炭、含水比30%、回帰式(5))

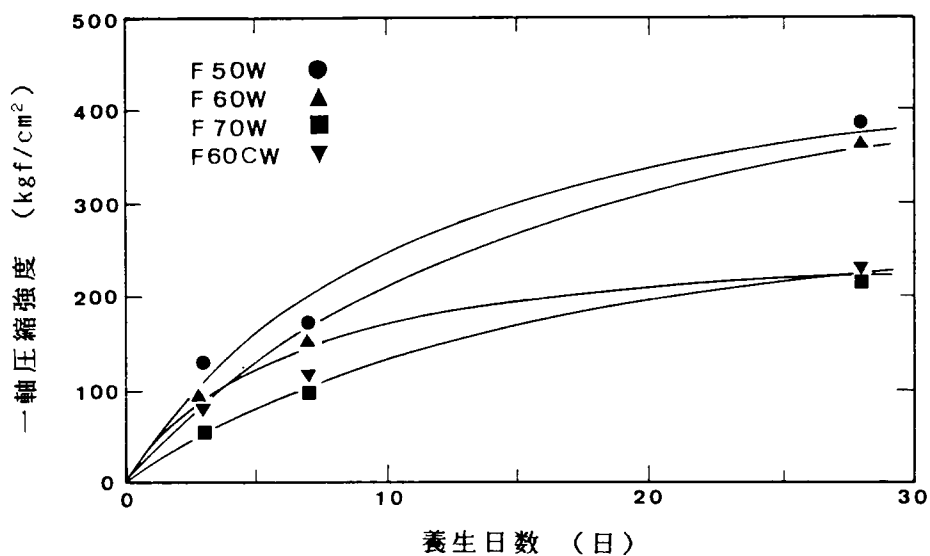
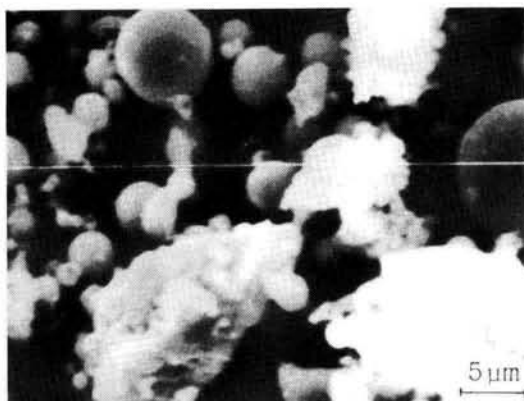
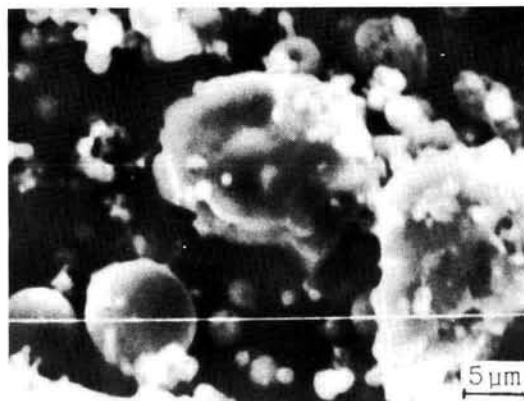


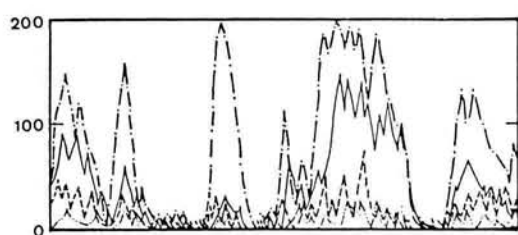
図-4.2.20 固化処理したフライアッシュの養生日数と強度の関係  
(国内炭、含水比50%、回帰式(5))



(a) SEM像

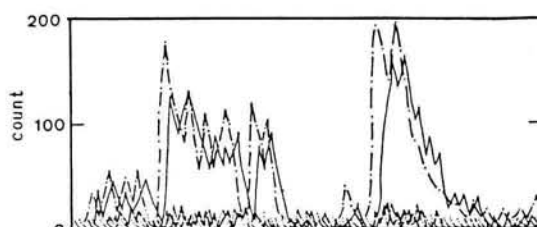


(a) SEM像

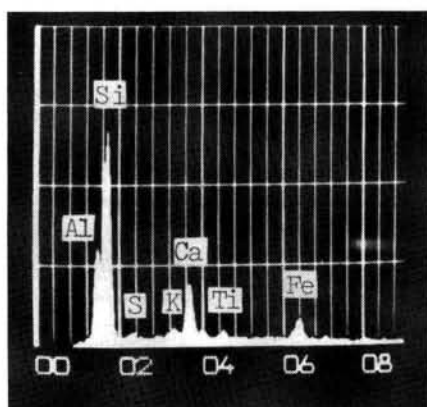


(b) 線分析結果

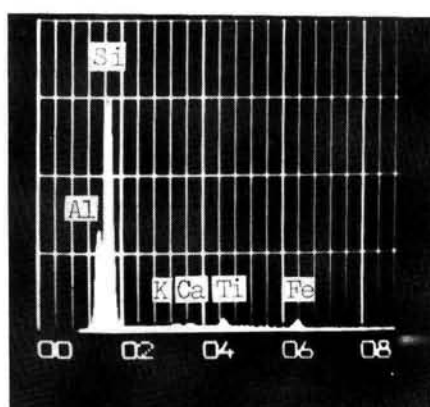
..... S  
 ----- Ca  
 - · - · - Si  
 \_\_\_\_\_ Al



(b) 線分析結果



(c) 元素分析結果



(c) 元素分析結果

写真-4.2.1 フライアッシュのSEM-EDXA分析結果（国内炭）

写真-4.2.2 フライアッシュのSEM-EDXA分析結果（国外炭）

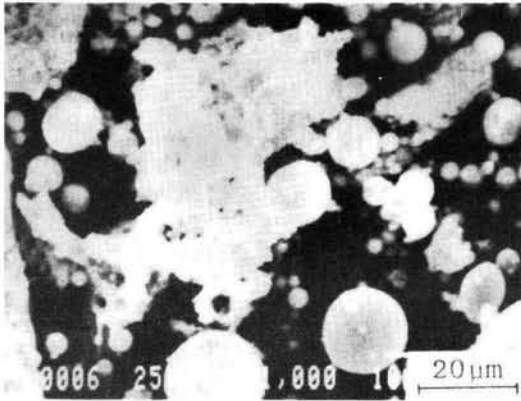


写真-4.2.3 フライアッシュのSEM像  
(国内炭)

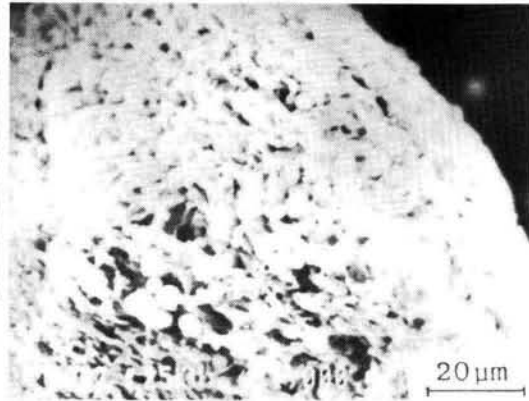


写真-4.2.4 フライアッシュのSEM像  
(国内炭)

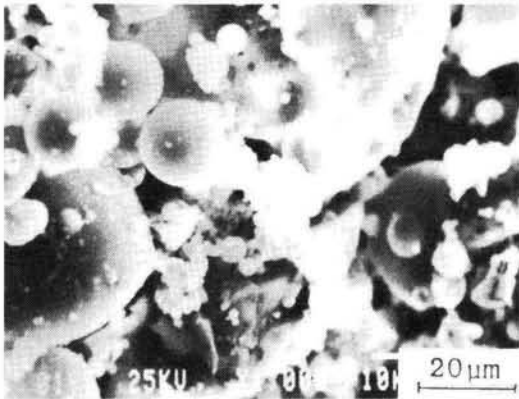


写真-4.2.5 不規則な形状のフライアッシュのSEM像  
(国内炭)

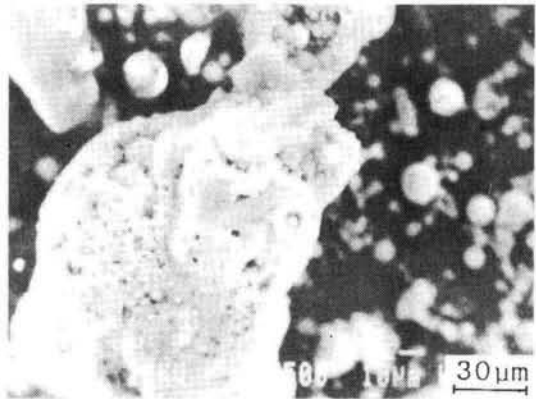


写真-4.2.6 不規則な形状のフライアッシュのSEM像  
(国内炭)

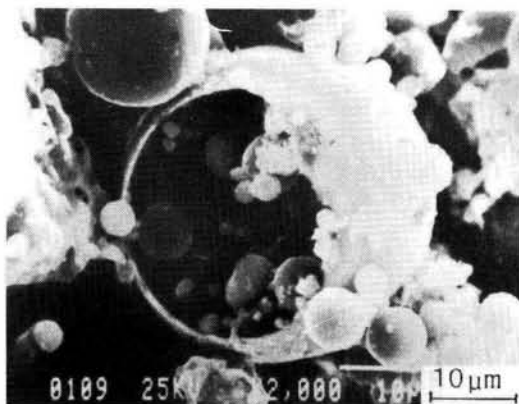


写真-4.2.7 中空状のフライアッシュのSEM像  
(国内炭)

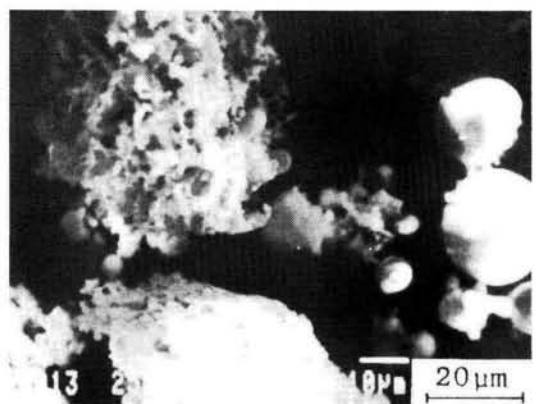


写真-4.2.8 不規則な形状のフライアッシュのSEM像  
(国外炭)

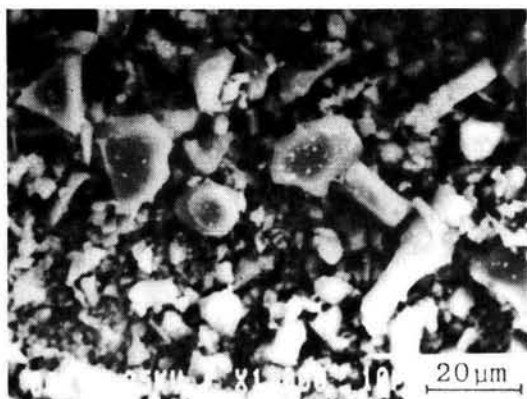


写真-4.2.9 高炉水砕スラグのSEM像

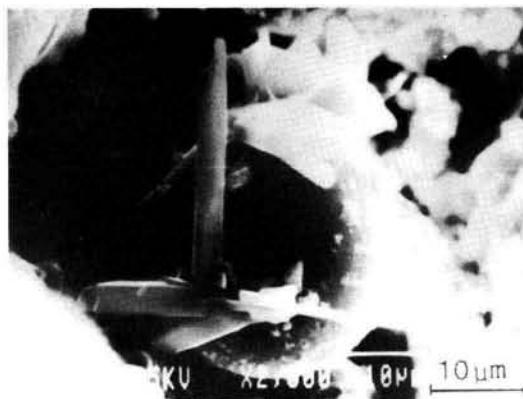


写真-4.2.10 加水したフライアッシュのSEM像（国内炭、7日養生）

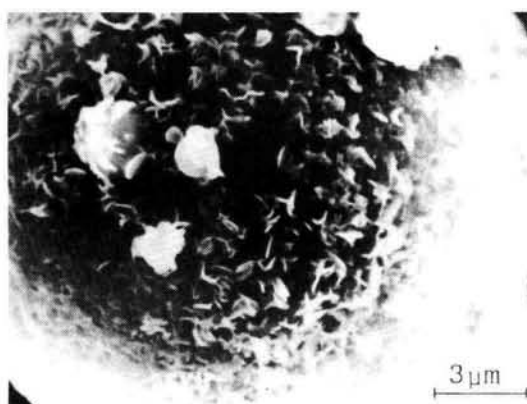


写真-4.2.11 加水したフライアッシュのSEM像（国内炭、7日養生）

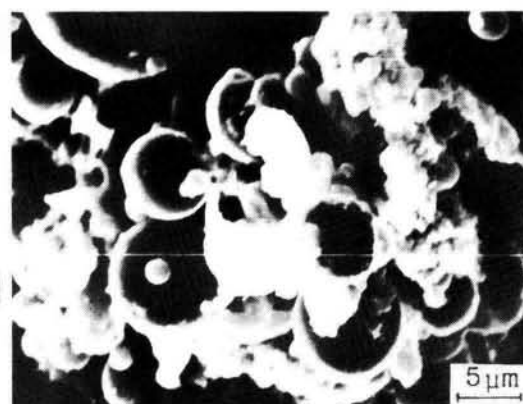


写真-4.2.12 加水したフライアッシュのSEM像（国内炭、7日養生）

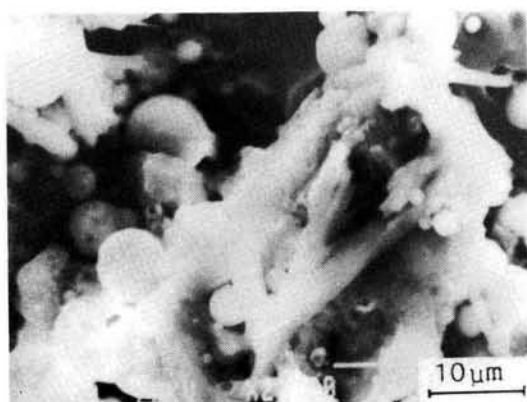


写真-4.2.13 加水したフライアッシュのSEM像（国外炭、7日養生）

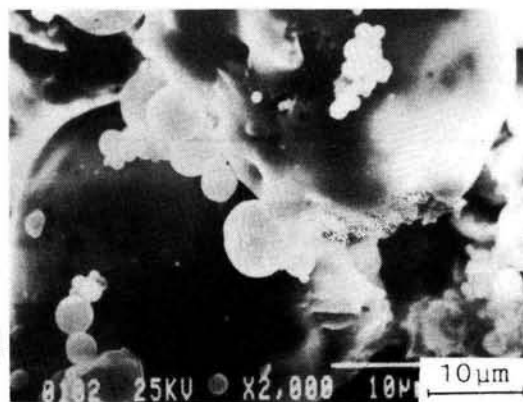
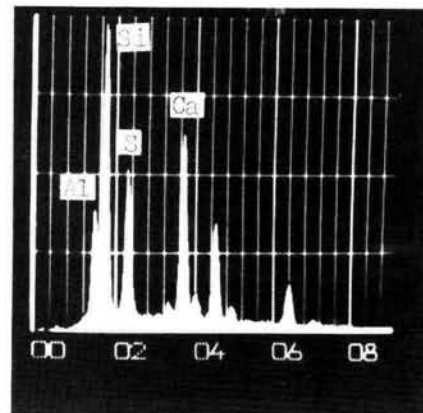


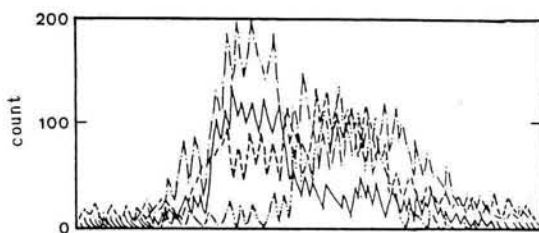
写真-4.2.14 加水したフライアッシュのSEM像（国外炭、7日養生）



(a) SEM像



(c) 元素分析結果



(b) 線分析結果

----- S  
----- Ca  
----- Si  
----- Al

写真-4.2.15 加水したフライアッシュのSEM-EDXA  
分析結果(国内炭、7日養生)

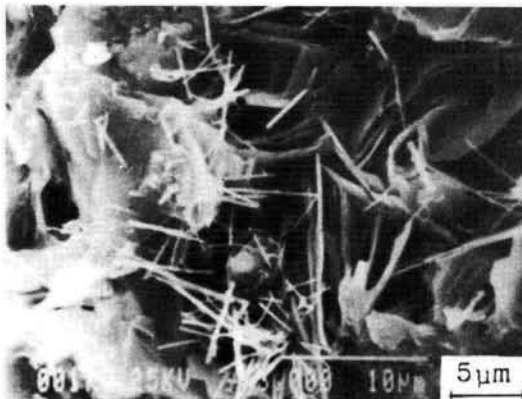


写真-4.2.16 固化処理したスラグSAの  
SEM像  
(7日養生、含水比30%)

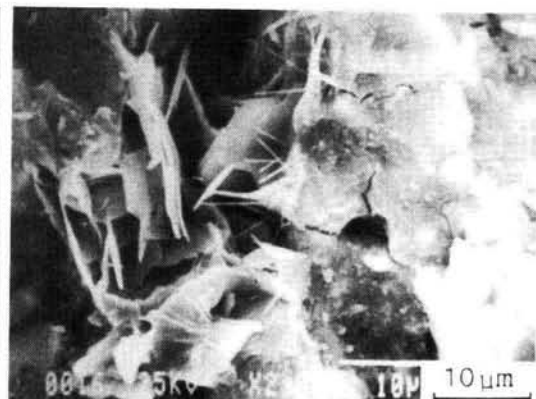
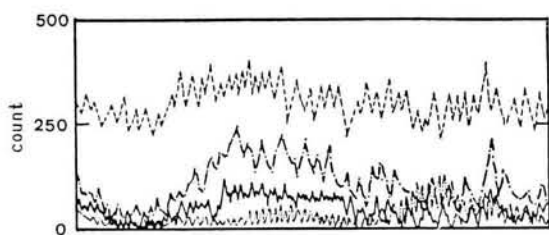


写真-4.2.17 固化処理したスラグSAの  
SEM像  
(7日養生、含水比30%)



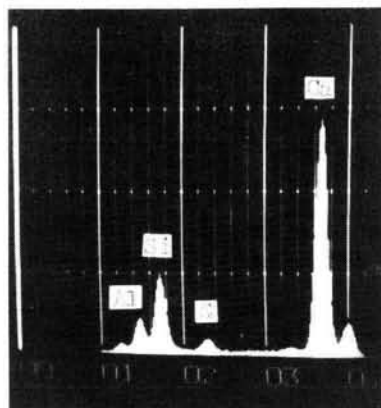


(a) SEM像



(b) 線分析結果

----- S  
 ----- Ca  
 ..... Si  
 - · - · - Al



(c) 元素分析結果

写真-4.2.18 固化処理したスラグSAのSEM-EDXA分析結果  
 (7日養生、含水比50%)

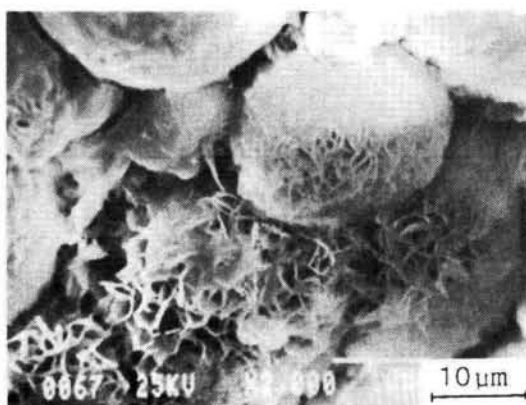


写真-4.2.19 固化処理したスラグSAのSEM像  
 (28日養生、含水比50%)

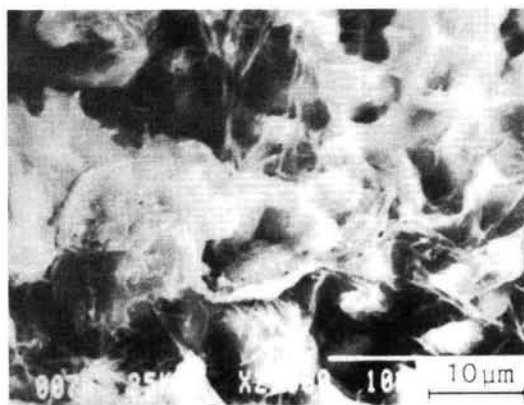


写真-4.2.20 固化処理したスラグSAのSEM像  
 (28日養生、含水比30%)



写真-4.2.21 F50DのSEM像  
(国内炭、3日養生、含水比30%)

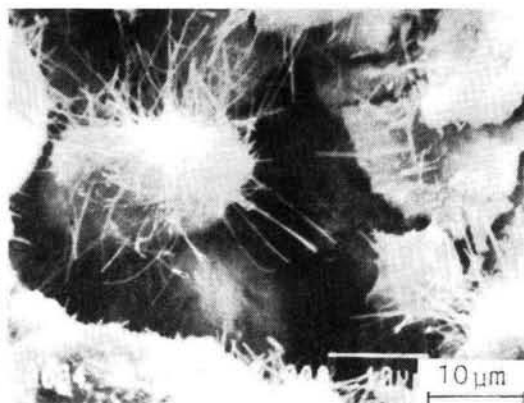


写真-4.2.22 F50DのSEM像  
(国内炭、3日養生、含水比30%)

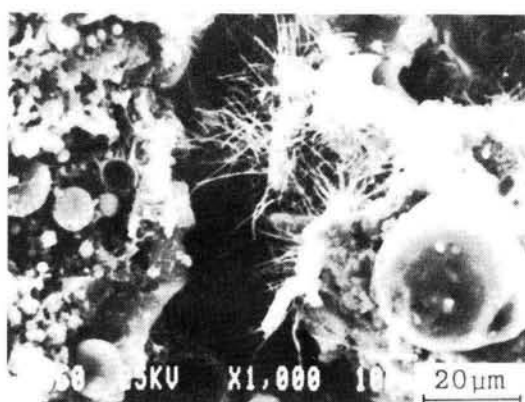


写真-4.2.23 F50DのSEM像  
(国内炭、28日養生、含水比30%)

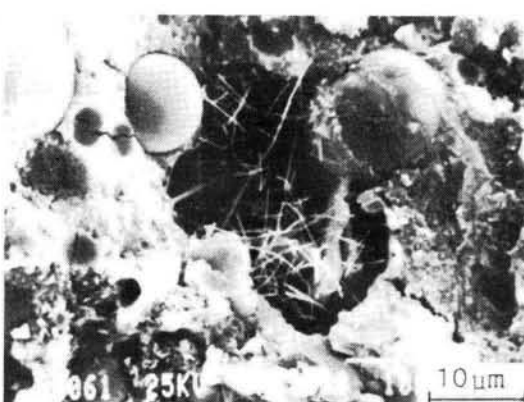


写真-4.2.24 F50DのSEM像  
(国内炭、28日養生、含水比30%)

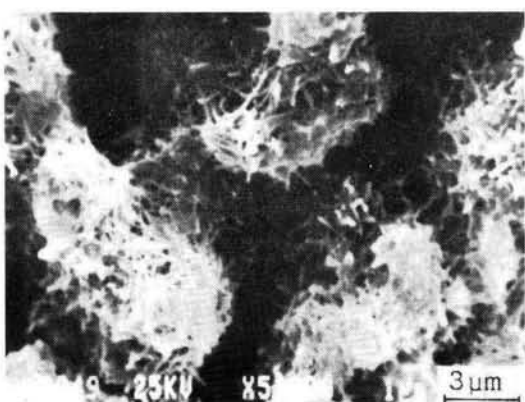


写真-4.2.25 F50WのSEM像  
(国内炭、28日養生、含水比50%)

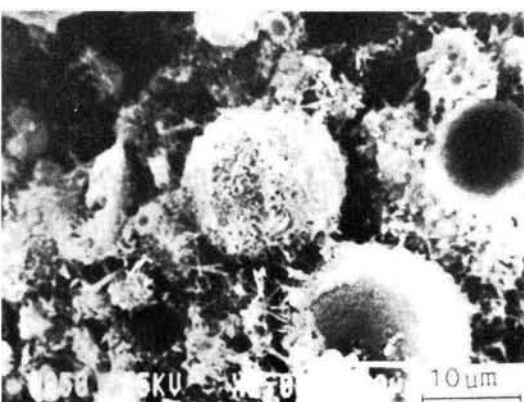


写真-4.2.26 F50WのSEM像  
(国内炭、28日養生、含水比50%)

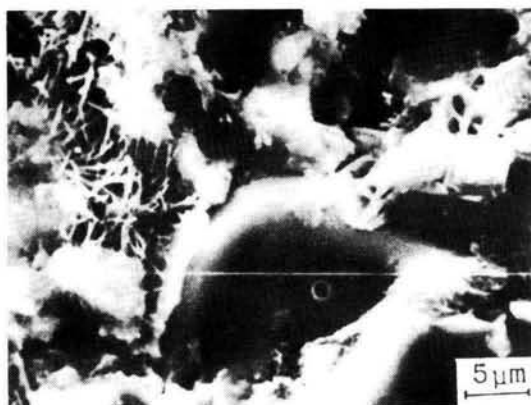


写真-4.2.27 F50WのSEM像  
(国内炭、28日養生、含水比50%)

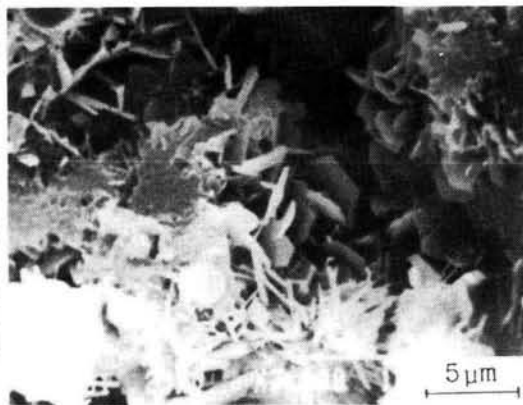


写真-4.2.28 F50WのSEM像  
(国内炭、28日養生、含水比50%)

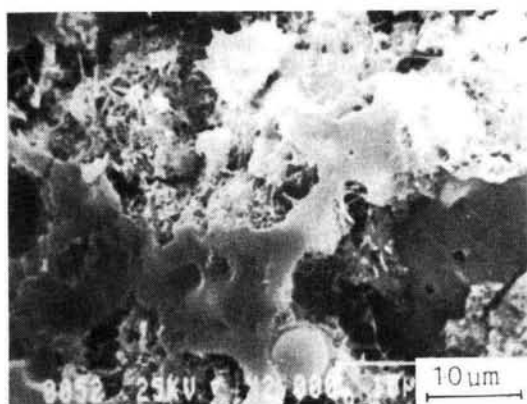


写真-4.2.29 F70WのSEM像  
(国内炭、28日養生、含水比50%)

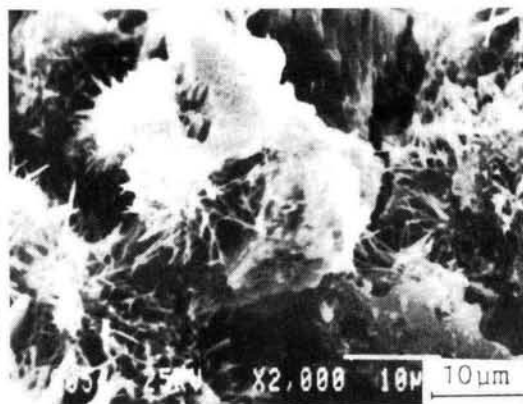


写真-4.2.30 F70WのSEM像  
(国内炭、28日養生、含水比50%)



写真-4.2.31 F70DのSEM像  
(国内炭、28日養生、含水比30%)

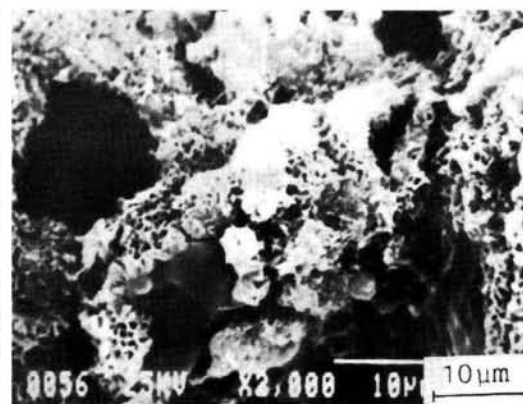


写真-4.2.32 F60CWのSEM像  
(国内炭、28日養生、含水比50%)

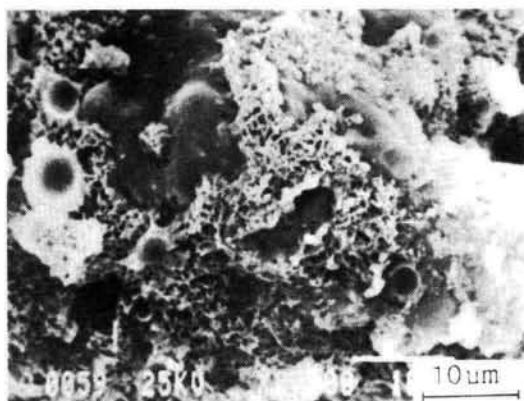


写真-4.2.33 F60CWのSEM像  
(国内炭、28日養生、含水比50%)

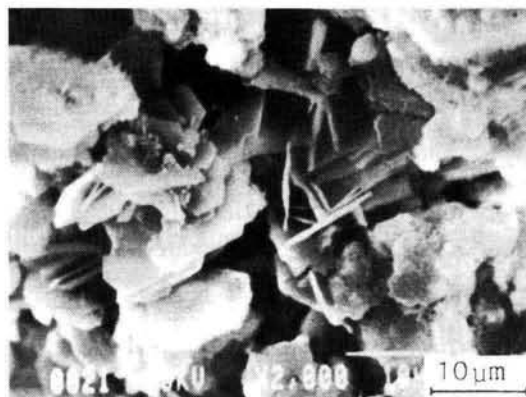


写真-4.2.34 F50WのSEM像  
(国外炭、3日養生、含水比65%)

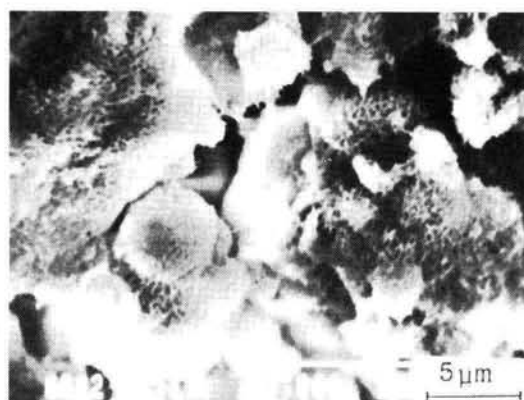


写真-4.2.35 F50WのSEM像  
(国外炭、3日養生、含水比65%)

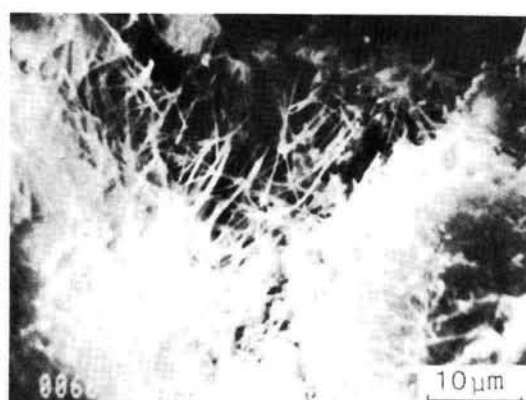


写真-4.2.36 F50WのSEM像  
(国外炭、28日養生、含水比65%)

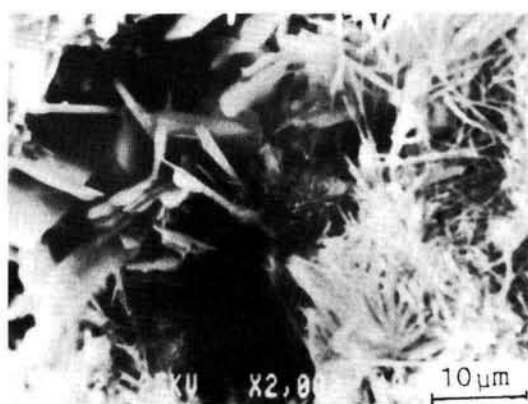
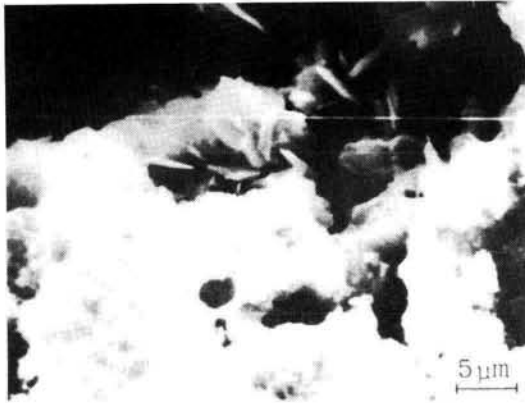
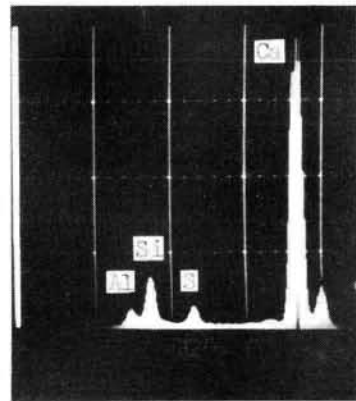


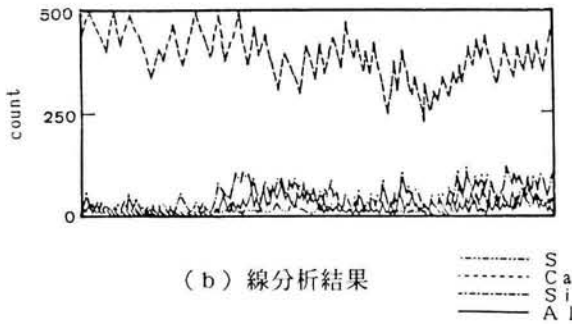
写真-4.2.37 F50WのSEM像  
(国外炭、28日養生、含水比65%)



(a) SEM像



(c) 元素分析結果



(b) 線分析結果

写真-4.2.38 F50WのSEM-EDXA分析結果  
(国外炭、28日養生、含水比65%)

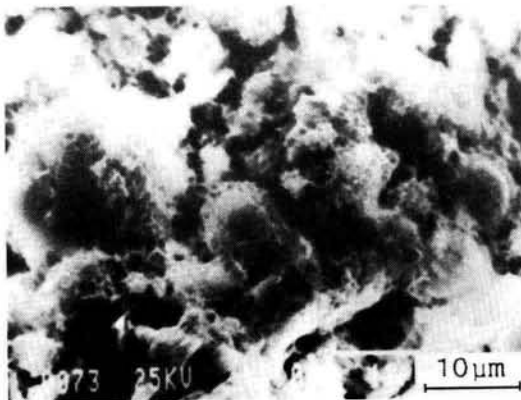


写真-4.2.39 F50WのSEM像  
(国外炭、28日養生、含水比65%)

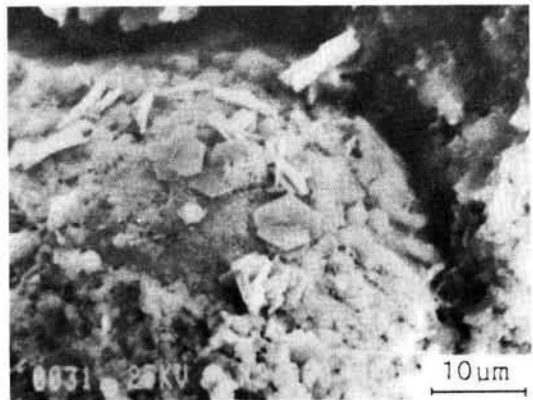


写真-4.2.40 F50DのSEM像  
(国外炭、3日養生、含水比35%)

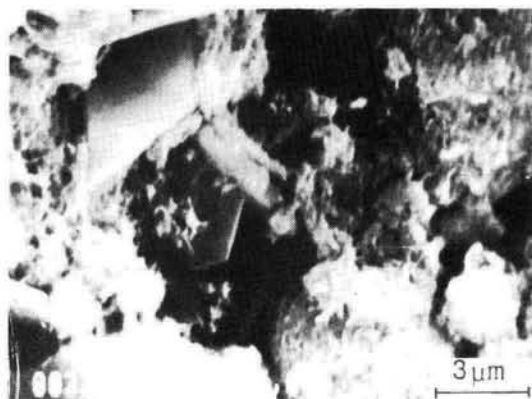


写真-4.2.41 F50DのSEM像  
(国外炭、3日養生、含水比35%)

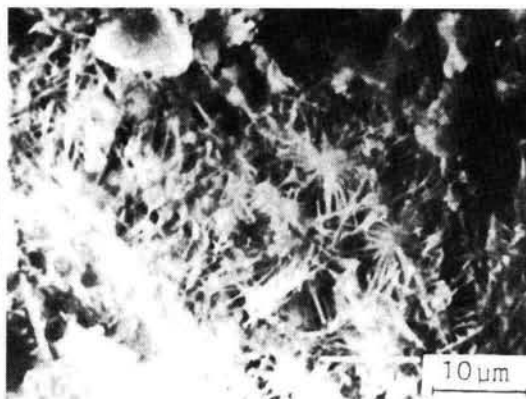


写真-4.2.42 F50DのSEM像  
(国外炭、28日養生、含水比35%)

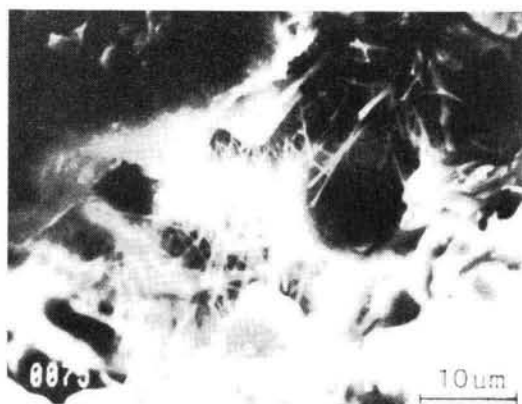


写真-4.2.43 F50DのSEM像  
(国外炭、28日養生、含水比35%)



写真-4.2.44 F50DのSEM像  
(国外炭、28日養生、含水比35%)

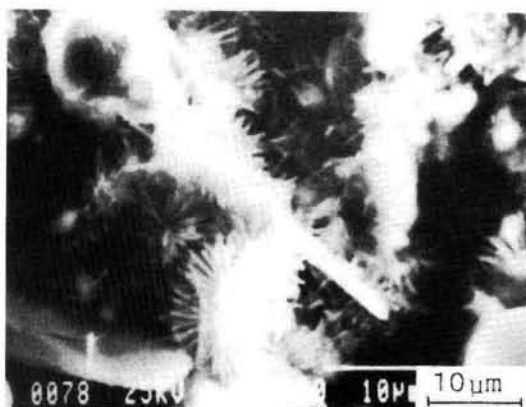


写真-4.2.45 F60CWのSEM像  
(国外炭、28日養生、含水比65%)



#### 4. 3 コンクリート微粉末の石灰・セメント系安定材による固化処理と

##### 土質安定材料への高度利用に関する研究

##### 4. 3. 1 概 説

コンクリート廃材とは、既設コンクリート構造物の機能損失、適応性の欠如（デザインの陳腐化など）などの理由により解体、修理される際に発生する建設廃棄物である。コンクリート廃材の正確な発生量を把握することは困難であるが、建設省が昭和49～52年に行った調査によると道路の改良や舗装などの直轄工事から発生したコンクリート廃材の量は108,000m<sup>3</sup>にのぼり、また、昭和50年の関東1都3県の土木・建築工事からの発生量は約280万m<sup>3</sup>になっている。一方、今日の生コンの生産量は年間1億～1.5億m<sup>3</sup>に達しており、将来、このうちの1/3～1/2を取り壊すとすれば、年間3000万～7000万m<sup>3</sup>のコンクリート廃棄物が発生すると予想される。これらのコンクリート廃棄物の一部は、盛土や護岸の根固めなどに利用されつつあるが、そのほとんどは再利用されていないのが現状であり、発生量の約70%が廃棄処分に頼っている<sup>1)2)</sup>。

近年、経済の発達に伴う建設工事量の増大による需要増により良質の骨材が減少し、また、採取地の遠隔化に伴い、その入手は困難になってきている。そこで、コンクリート廃材の大量消費と有効的な再利用の手法としてクラッシャなどを用いて破碎処理を施し、再生骨材として利用する方法が確立されている<sup>3),4)</sup>。しかしながら、再生骨材生産時の破碎処理に伴って質量で約30%程度発生する二次廃材のコンクリート微粉末は、粒径が小さく処理・処分が困難である<sup>5)</sup>ため、これを、いかに安価に処理し、あるいは有効に利用しうるかが骨材再生産システムとしての実用化の重要課題となっている。

本節では、このコンクリートの二次廃材であるコンクリート微粉末を石灰・セメント系安定材で固化し、有効利用の可能性を検討した。

安定材としては普通ポルトランドセメント（以後、セメントと呼ぶ）を用い、さらに固化効果を促進させるためにエトリンガイトを人工的に生成させる固化助材として炭酸アルミネート系塩材料（以後、C A S 材と呼ぶ）を用いている。そして、コンクリート微粉末と安定材との固化特性を求め、低強度材料や高強度材料としての有効利用の可能性について追究する。また、養生に伴う強度発現傾向を定式化し、コンクリート微粉末を用いた安定処理の最適配合を求める。さらに、コンクリート微粉末を安定処理の対象としてではなく、より高度な利用方法としてコンクリート微粉末をセメントなどの安定材と混合して付加価値を高め、それを軟弱土に対する土質安定材料として利用する可能性などについて検討する。

#### 4. 3. 2 材料特性と実験概要

##### (1) 使用材料

使用したコンクリート微粉末はコンクリート廃材から再生骨材を製造する際、インパクトクラッシャなどで破碎するときに発生するもの<sup>6)</sup>であり、その物理的性質および粒径加積曲線を表-4.3.1、図-4.3.1に示す。コンクリート微粉末は非常に粒子が細かく、ブレン値は4350 cm<sup>2</sup>/gで普通ポルトランドセメントより大きな値である。比重は2.84と普通の骨材や土より、やや大きな値を示している。また、粒度分布は砂分15.5%、シルト分73.9%、粘土分10.6%であり、土質としてはシルトに分類される。加積通過率60%の粒径D<sub>60</sub>は28μmであり、大変小さな粒子から構成されていることがわかる。しかし、100μm以上の粗粒子も約10%含有しており、均等係数や曲率係数から考え、比較的粒度分布は良い試料といえる。コンクリート微粉末の電子顕微鏡写真、およびSEM-EDXA分析の結果を写真-4.3.1~3に示す。これらによると、コンクリート微粉末は角ばった輪郭の比較的大きな粒子と極く小さな不定形の粒子からなっている。また、SEM-EDXA分析ではCa、Siの大きなピークとAl、S、KおよびFe元素の存在が認められている。X線回折の結果(図-4.3.2)ではコンクリート廃材中の骨材破碎による石英や長石の他、消石灰や炭酸カルシウムが確認できた。以上の結果、コンクリート微粉末はセメントの水和やカルシウム分の炭酸化が終了し、比較的安定した試料であり、硬化反応という点においては活性の小さなものである。

一方、土質安定処理の対象土として用いた信州ロームは、表-4.3.2に示すように自然含水比が86.4%、強熱減量が11.6%の高含水比かつ高有機物含有量の試料であり、道路土工では捨土されるものである。一般にロームはセメント系安定材による固化処理が困難な試料であり、特に、アロフェン粘土のボゾラン材としての硬化活性は小さいといわれている<sup>7)</sup>。粒度分布は砂分25.2%、シルト分61.7%、粘土分13.1%で、土質分類としてはシルトに分類される。X線回折の結果(図-4.3.3)、一次鉱物として石英の大きなピーク、および長石のピークが認められ、粘土鉱物としてカオリナイトやクロライトの存在が認められた。また、写真-4.3.4のSEM-EDXA分析の結果、成分元素としてはSi、Al、Feなどが多く、その他Ca、Kなども少量含まれている。

##### (2) 実験概要

コンクリート微粉末の固化に使用した安定材とその配合は次の三種類である。なお、C A S材は消石灰20%に硫酸アルミニウム50%、炭酸ナトリウム30%を混合したものである。

(ア) セメント単独(配合C C)と、セメント95%にC A S材を5%混合した安定材(配合C



BC)とをコンクリート微粉末に3、6、9、12%添加したもの(表-4.3.3)。

(イ) コンクリート微粉末にその質量の0~40%のセメントと0~20%のCAS材を添加し、高強度の固化を目的としたもの(表-4.3.4)。

(ウ) コンクリート微粉末をセメントやCAS材と混合したもの(配合LC50、LC50C)を土質安定材料として信州ロームに20、25、30%添加したもの(表-4.3.3)。

いずれも安定材の配合は、予備試験で固化効果、および硬化反応性を確認した後、添加材の配合や含水比を決定した。

強度試験を行う供試体(直径5cm、高さ10cm)の作成は、処理試料が分離しない程度に流動性をもたせた前記の実験方法(7)、(イ)については土質工学会基準、「安定処理土の締固めをしない供試体作製方法」(JSF E 821)に準じて供試体の成形を行った<sup>8)</sup>。また、締固めを行う信州ロームの安定処理ではランマーを用い、JIS A 1210の第一方法と同じエネルギーで締固めた。養生は恒温室(室温20℃、湿度90%)にて3日、7日、28日の3とおりで行い、養生後、一軸圧縮試験を行った。

なお、コンクリート微粉末にセメントとCAS材を混合したものを、土質安定材料として信州ロームに添加したものについては、路盤、路床材としての適用性を検討するためにCBR試験を行い、併せて6日間恒温室で養生させたのち、1日水浸させた供試体で一軸圧縮試験も行った。

#### 4. 3. 3 石灰・セメント系安定材を添加したコンクリート微粉末の強度特性

##### (1) コンクリート微粉末の低強度材料としての強度特性

図-4.3.4はコンクリート微粉末にセメントのみを添加したCCと、セメント：CAS材=95：5で添加したCBCの養生日数に伴う強度の変化を比較したものである。安定材の添加率はコンクリート微粉末の乾燥質量に対して3、6、9、12%の4とおりである。これによると、セメントに固化助材として添加したCAS材の固化刺激効果が顕著に現れており、CBC供試体は、すべての添加率においてセメント単独の強度を上回っている。利用の対象を下層路盤においた場合、セメント安定処理土の目標強度は7日後の一軸圧縮強度が10kgf/cm<sup>2</sup>である<sup>9)</sup>が、セメントのみの添加では9%の添加量が必要であるのに対して、CAS材を固化助材として用いた場合は6%の添加量で目標強度を満足している。このことは、わずか5%のCAS材の添加により安定材使用量を節約できることになり、また、同じ添加量の場合でも早期に目標強度を達成することができ、施工性の向上に役立つことになる。

表－4.3.5はC A S材の添加による固化刺激効果を調べるために、C B CとC Cとの強度比 $[q_u(CBC)/q_u(CC)]$ を添加率および養生日数ごとにまとめたものである。すべての場合でC B Cの強度はC Cのそれを上回っており、添加率が3%の3日養生ではC B CはC Cの6倍以上もの強度を示している。そして、強度の増加は安定材添加量の少ない場合や養生初期ほど顕著であることがわかる。また、図－4.3.5はC A S材の最適添加量を求めるために、安定材添加率を9%の一定値とした配合C B Cにおいて、安定材中のセメントとC A S材との配合比を100:0（セメント単独）、98:2、95:5、90:10の4とおりに変えて行った実験結果である。これからわかるように、セメントとC A S材の配合比は本研究で採用した95:5が最適なものと考えられる。

## (2) コンクリート微粉末の高強度材料としての強度特性

安定材の添加率を多くし、上層路盤材、高強度材料、および土質改良材などの適用性を検討した強度試験の結果が図－4.3.6である。配合C 5 0、C 6 0、C 7 0のいずれの配合においても、7日養生では一軸圧縮強度が110～270kgf/cm<sup>2</sup>と大きな値になっており、コンクリート微粉末に対するセメント量を減じても強度的には上層路盤材として十分利用できることがわかった。またC 7 0からC 6 0、C 5 0とセメントの量が順次増えるにつれて強度は増加し、C 5 0では3日で約200kgf/cm<sup>2</sup>の一軸圧縮強度を得ており、土質改良材としての有効利用の可能性が高いものと考えられる。また、C 6 0とC A S材を添加せずにセメントのみを添加したC 6 0 Cとを比較してみると、3日養生ではC 6 0の強度はC 6 0 Cに比べ約15%程度増加しており、養生初期から長期にわたりC A S材の添加による固化効果が見られる。

なお、コンクリート微粉末にC A S材のみを8:2の割合で添加した実験も行ったが、図－4.3.6に見られるようにあまり強度は発現せず、特に、長期強度の伸びがみられない。これはコンクリート微粉末自身の硬化活性が低いためC A S材との硬化反応が持続しなかったものであり、コンクリート微粉末の固化にはセメントのような自硬性の安定材が高い強度を発現することがわかった。

## 4. 3. 4 コンクリート微粉末とセメント、C A S材の混合による

### 土質安定材料としての適用

コンクリート微粉末を高度利用するため、これにセメントとC A S材を混合したものを安定処理材として信州ロームに添加し、経済的に優れた固化処理の可能性を検討した。用いた安定材の配合は高強度材料の可能性を追究したC 5 0とセメントだけの配合であるC 5 0 Cであり、

添加率は信州ロームの湿潤質量あたりで20、25、30%の3とおりとし、比較のため無添加の試験も実施した。

図-4.3.7はCBRと一軸圧縮強度の関係を示したものであるが、測定値の数は少ないながらもCBRと一軸圧縮強度 $q_u$ の間には $CBR \approx 8.44q_u - 2.59$ という関係が成り立っている。また、図-4.3.8に示すようにC50、C50Cとも安定材添加率20%では改良前とほとんど変わらないCBR、および一軸圧縮強度になっているが、添加率が25%に増加すると改良度は大きく向上しており、添加率30%で得られた値以上になっている。また、添加率が同じであれば、C50よりもC50Cを安定材として添加した方が大きな改良効果が得られており、ロームに対するセメントのCAS材併用効果は見られなかった。この原因は3章3.2で明らかにしたフミン酸の影響が考えられる。使用したロームは強熱減量が11.6%と大きなものであったが、固化の阻害要因となるフミン酸の含有量は比較的少ないものであり、その結果、セメントだけのC50Cを添加した処理土の強度が大きくなったものと考えられる。しかしながら、セメントの増量材としてコンクリート微粉末を50%程度用い、新たに作製した土質安定材料を25%程度添加することによって、ロームの良好な改良効果の得られることが明らかとなった。

#### 4.3.5 固化処理したコンクリート微粉末の反応生成物と微視的構造

##### (1) 電子顕微鏡による微視的構造の観察

安定処理試料の電子顕微鏡観察は最も反応性がよいと考えられる安定材添加率12%のものについて行っている。

配合CCおよび配合CBCのSEM像とSEM-EDXA分析結果を写真-4.3.5~16に示す。CCおよびCBCのSEM観察ではいずれもエトリンガイトの針状結晶は3日養生ではあまり見られない。CCのSEM観察では粒子表面に不定形箔状や微細な粒状の反応物が多くみられ、一部で微小な針状の反応物が見られる(写真-4.3.5, 6)。箔状の生成物は、SEM-EDXA分析の結果、Ca、Siの大きなピークが認められることからCSH系反応生成物であると推定され(写真-4.3.7)、また、針状結晶はSのピークが認められることからエトリンガイトであると考えられる。この針状結晶は養生28日になると、結晶自体の大きさはあまり変化していないが、その数は明らかに増加している(写真-4.3.8, 9)。

一方、CBCでは、養生3日でセメント水和物であると考えられる不定形箔状あるいは石灰の粒状反応物が生成している(写真-4.3.10, 11)。このような生成物が養生28日になると成長してコンクリート微粉末の粒子表面を完全に覆うようになる(写真-4.3.12)。また、長期

養生では写真－4.3.13, 14に見られるような厚い板状の結晶が激増し、固化強度の増大に大きな影響を与えているものと思われる。この六角板状の結晶は空隙部分に特に多く観察された。写真－4.3.15, 16のSEM－EDXA分析結果などによると、粒子表面を覆っているCSH系生成物の間に見られる微少な板状結晶はAlが特に多く含まれていることから、CAH系反応生成物であると考えられる。

次に、配合C50、配合C70、および配合C60Cの材令28日のSEM写真とSEM－EDXA分析結果を写真－4.3.17～28に示す。

C50では写真－4.3.17に見られるような薄い板状結晶が重なり合っている部分や、写真－4.3.18, 19のような針状や板状結晶が非常に多く存在しているのが確認された。また、ヒダ状に無数の反応物が生成し、板状結晶へと成長していく過程も見られる（写真－4.3.20）。SEM－EDXA分析結果には、試料の粒子表面を覆っている箔状のCSH系生成物の一部に、針状結晶および不定系板状の生成物が見られる。これらの元素分析結果が写真－4.3.21, 22であり、針状結晶はエトリンガイトであり、板状結晶は結晶の大きさ、S成分の含有量および生成時期を考え合わせるとモノサルフェート水和物であると考えられる。

C70ではC50とほぼ同様な反応生成物が観察され、やはり多量の板状結晶および針状結晶が認められた。写真－4.3.23は多量に生成したエトリンガイトの針状結晶がネット状に張り巡らしている様子を表している。これがさらに成長して写真－4.3.24のようにコンクリート微粉末の粒子の表面を完全に覆うようになり、粒子の移動を拘束して強固な構造骨格を形成している。またC50と同様、空隙部分に太い板状結晶が重なるようにして生成しているのが見られた（写真－4.3.25）。

C60CではC50、C70と異なりエトリンガイトがあまり観察されなかった。CSH系反応生成物の間には種々の板状結晶がみられるが大きなものはみられない（写真－4.3.26）。そして、ヒダ状から板状への進行過程にあるような生成物が多かった（写真－4.3.27, 28）。

コンクリート微粉末とセメントの混合材を安定材として信州ロームに添加したものでは、すべての処理土で写真－4.3.29に見られるようなCSH系反応生成物、消石灰、および炭酸カルシウムとみられる箔状や微細粒子の結晶が多く生成しているのがみられた。

ロームに配合C50と配合C50Cを20%添加したもののSEM写真ではいずれもよく成長したエトリンガイトが見られる。CAS材を用いていないC50Cの写真－4.3.30～32ではCSH系生成物と考えられる箔状の生成物の表面にエトリンガイトが成長しており、またCAS材を併用したC50ではエトリンガイトを結合し、表面を覆うような形でCSH系反応生成物と消石灰の大きな生成物もみられる（写真－4.3.33, 34）。

## (2) X線回折による反応生成物の検討

図-4.3.9は配合C C、および配合C B CのエトリンガイトのX線回折強度( $d = 9.7 \text{ \AA}$ )と養生日数との関係を示したものである。3日から7日にかけて、特に、配合C B Cで養生日数の経過に伴うエトリンガイトの回折ピークが高くなる傾向がみられるが、7日から28日の長期養生ではむしろ低くなっている。しかし、供試体は密封養生しており、エトリンガイトが炭酸化反応などで変質した可能性は少ない<sup>10)</sup>ため、エトリンガイトの生成量が減少するとは考えにくい。そこで他の反応生成物によりエトリンガイト結晶の表面が覆われたために、X線回折強度が低下したと思われる。図-4.3.10は配合C B Cと配合C Cの7日養生した供試体のうち、安定材を3%添加した処理試料を基準として安定材の添加量を6、9、12%に増加したときの $\text{Ca(OH)}_2$ と $\text{CaCO}_3$ のX線回折強度の差をプロットしたものである。配合C Cではセメントの水和反応に伴い生成される $\text{Ca(OH)}_2$ が安定材の添加率に応じて認められ、また、 $\text{Ca(OH)}_2$ の炭酸化もその含有量に応じて進行していることがわかる。一方、C A S材を添加したC B Cでは、養生初期のエトリンガイト生成反応に関係しなかった余分な $\text{Ca(OH)}_2$ をC A S材により多く炭酸化していることを示している。すなわち、C A S材の添加によりエトリンガイトの生成とともに、短期強度増加の阻害要因となる $\text{Ca(OH)}_2$ を非常に短い期間に安定した生成物である $\text{CaCO}_3$ に変化したことが初期養生強度が大きくなった原因の1つと考えられる。

配合C 5 0、C 6 0、C 7 0については、図-4.3.11に示すように養生日数に伴うエトリンガイトのピークの増加傾向は認められず、かなり早期にエトリンガイトは生成していたと思われる。C 5 0、C 6 0、C 7 0のエトリンガイトのピークは明らかにC 6 0 Cのそれを上回っており、さらに、C A S材添加率の高いC Aでは多量のエトリンガイトの生成が認められた。しかし、C AではエトリンガイトのピークがC 7 0以上に出ているものの、強度発現は3日養生ではC 7 0と同じ程度であり、その後の強度増加は小さなものであった。つまり、コンクリート微粉末において強度発現の主要因となる反応生成物はエトリンガイトではないということである。ここで、C S H系反応生成物のピーク( $d = 2.80 \text{ \AA}$ )に着目してみると、図-4.3.12に示すようにエトリンガイトの場合とは逆にC Aが一番低い値となっており、C 7 0などと比べ、一軸圧縮強度が低かった結果と一致する。従って、C Aの強度の伸びなかった大きな原因、言い替えると固化強度の発現にエトリンガイト以上に貢献した反応生成物はC S H系反応物であったと考えられる。

以上の結果、高強度材料の固化はC S H系反応物がコンクリート微粉末粒子を結合することによって、剛性の高い構造体を形成し、長期にわたり大きな強度を得られることが分かった。そして、養生初期で生成されるエトリンガイトはC S Hが剛性を得るまでの間の強度増加に貢献していることが明らかになった。

なお、C A H系およびC S A H系の反応生成物については、いずれの配合においてもその存在が認められるものの、強度との相関関係などについてははっきりとした特徴は認められなかった。

#### 4. 3. 6 石灰・セメント系安定材によるコンクリート微粉末の強度発現の定式化と最適処理条件の推定

表－4. 3. 6～8はコンクリート微粉末を固化処理した一軸圧縮試験の結果を、供試体の養生日数（X）と強度（Y）の関係について2章2. 2に示した5種類の回帰式にあてはめた結果である。ここで回帰に用いたデータは3，7，28の養生日数について、それぞれ3個の強度試験の結果を用いている。

コンクリート微粉末を低強度材料としての利用を目標として強度発現を追及した配合C Cと配合C B C（表－4. 3. 6）では、強度発現のばらつきの大きな添加率3％を除くと、C Cで回帰式(4)、C B Cでは式(5)の相関係数が高く、最も適合していることがわかる。これはセメントだけの比較的少ない添加量では養生に伴う強度の発現が急激でなく、長期にわたる強度の増加がみられるためである。一方、C A S材を添加したC B Cでは養生初期の強度増加が顕著であり、長期の強度発現が少ない結果である。また、安定材中のC A S材の割合を変化させた実験、および高強度材料への利用を改良目標とした安定材添加量の多い配合（表－4. 3. 7, 8）では式(5)、式(2)の回帰式が適合しており、長期養生の強度に比べ、養生初期の強度増加が顕著であったことを示している。以上の結果、各種の添加材の種類や配合に対し、最も広い範囲で適合している次の回帰式(5)を用いて以後の強度発現についての検討を行う。

$$Y = \frac{X}{A + B X} \quad (5)$$

ここで、Y : 一軸圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

X : 養生日数 (日)

A、B : 回帰係数

図－4. 3. 13は配合C CとC B Cの安定材添加率と回帰係数の関係である。どちらの安定材でも9％までは添加率が増加するに従い係数A値、B値ともに大きく減少しており、養生初期から長期にわたる強度の増加がみられる。しかし、安定材添加量が12％のものはB値が添加率9％の約80％程度の値となり、長期強度は増加しているものの、安定材添加率の増加に対する強度の増加率は小さく、安定材の増加分が有効に働いていないことがわかる。これらの結果、安定材添加量は9％程度が最も処理効率の高いことがわかる。また、係数B値を比較すると、安

安定材添加率が3、6％ではCCに比べCBCが、9、12％ではCCが高強度になっており、硬化反応特性の違いを示している（図-4.3.14）。

表-4.3.7は配合CBCにおいて安定材の添加率を9％としたときの、安定材中のセメントとCAS材との配合比を100:0、98:2、95:5、90:10の4とおりに変えて行った結果である。長期強度を表す回帰係数B値はCAS材添加量を増加するに従い若干ではあるが増加の傾向を示しており、5、10％の添加量では無添加に比べ長期強度で約75％程度の値に減少している。一方、係数A値は添加量5％が最も小さく、養生初期の強度発現が著しいことを示しており、5％以上CAS材を添加しても養生初期から長期にいたる強度発現が低いことを示しており、養生初期強度を高めるためには5％程度の添加量が最適と考えられる。

次に、高強度材料としての強度の発現を追及した安定材添加量の多い配合の回帰係数を図-4.3.15に示している。係数B値は配合C70以外のセメント添加量の多いものはほぼ同じ値を示しており、セメント添加量が配合C60の30％以上では長期強度に変わりがないことを示している。しかし、係数A値は配合C70、C60、C50の順にセメント添加量が増加するに従って大きく減少しており、養生初期の強度発現がセメント添加量に応じて大きな違いのあることがわかる。また、CAS材を添加していないC60Cはセメントの10％をCAS材で置換したC60に比べ、長期養生の強度は変わらないが、A値が約1.3倍の値になり、養生初期の強度発現が小さいことを示している。

以上の結果、コンクリート微粉末のような硬化活性の低い、細粒分の多い処理対象試料の強度発現の定式化において、道路用材などの比較的低強度の固化目標で安定材添加量の少ない場合（本研究では12％以下）は、養生初期の強度増加、および安定材添加率6％以下の配合の長期強度はCAS材を添加したCBCが効果的であり、式(5)が適合する。また、9％以上の添加率ではセメントだけを添加したCCはCBCに比べ、養生初期の強度増加の程度は小さくなっているが、終局強度はCBCを上回る値となり式(4)が適合する。そして、数10kgf/cm<sup>2</sup>程度の目標強度で養生初期の高強度が必要でない場合は安定材はセメントだけのCCが効果的である。一方、安定材を多量（30～50％）に添加する固化目標強度が数100kgf/cm<sup>2</sup>の高強度の場合は、養生初期の強度増加が大きくなり、配合CC、CBCともに式(5)が適合する。そして、終局強度は安定材中のセメント量に依存するが、最適添加量の存在することが明らかになった。

#### 4.3.7 本節のまとめ

現在、コンクリート廃材はその70％が廃棄処分に頼っており、ほとんど再利用されていないのが現状である。そのコンクリート廃材の再利用の最も有効な手段である再生骨材を製造する

際に発生する二次廃材のコンクリート微粉末の固化処理について、本節では、安定材として普通ポルトランドセメントとC A S材とを用いて、その固化特性を調べた。そして、より高度な利用方法としてセメントと混合し、それを安定材として有効利用する可能性を検討した。

得られた結果をまとめると次のとおりである。

- (1) コンクリート微粉末はポズラン反応などの硬化活性においてあまり有効な試料ではないが、セメントなどの自硬性の安定材の添加により強度は増加し、有効利用が可能となる。
- (2) コンクリート微粉末に対し、安定材としてのセメントの一部を固化助材としてC A S材で置き換えることによりセメント単独の添加に比べ顕著な強度増加がみられる。特に、安定材添加率の小さい場合と、養生初期の強度発現が大きく、その最適添加量は安定材の5%である。
- (3) コンクリート微粉末にセメントとC A S材を95 : 5で混合した安定材を6%程度から10数%添加することにより、下層および上層路盤として利用することが可能である。
- (4) コンクリート微粉末に40~50%のセメントと0~10%のC A S材を添加することにより、3日養生で100~200kgf/cm<sup>2</sup>の強度が得られ、コンクリート2次製品のような高強度材料としての利用が可能である。また、高度利用の方途としてセメントとコンクリート微粉末を1 : 1の割合で混合したものを安定材とし、C B Rが約5のローム土に25%程度添加することにより、C B R30以上の良好な土質安定処理効果が得られる。
- (5) 安定材としてセメントだけの配合C CとC A S材を添加した配合C B Cを比較すると、高い長期強度を得るためには、6%までの低添加率ではC B Cが、また、9%以上の高添加率ではC Cが有効である。

また、回帰係数の比較によりどちらの安定材でも9%までは添加率が増加するに従い強度の増加がみられ、それ以上の添加率では強度増加率が低下するため、安定材の最適添加量は9%であることがわかった。さらに、高強度材料を目的とした添加量の多い配合でも強度の増加にはピークがあり、C A S材を10%添加し、セメントを併用したものの最適セメント添加量は30%である。

- (6) 強度増加に貢献する反応生成物は、養生初期においてはセメントによるC S H系反応生成物や、エトリンガイトおよび圧縮試験時に強度低下の要因となるCa(OH)<sub>2</sub>を炭酸化するCaCO<sub>3</sub>である。また、長期にわたる強度増加はCaCO<sub>3</sub>やC S H系反応生成物およびポズラン反応によるものと考えられる。特に、処理土の骨格構造を形成し、剛性を高めるのはC S H系反応生成物である。
- (7) コンクリート微粉末のような硬化活性の低い、細粒分の多い処理対象試料の強度発現の定式化において、固化目標が数10kgf/cm<sup>2</sup>程度の比較的低強度の場合、安定材としてセメ



ントの添加では式(4)が、また、C A S 材を用いた処理試料では式(5)が適合する。

$$Y = \frac{X}{A + B X} \quad (5)$$

$$Y = A X^B \quad (4)$$

一方、安定材を多量（30～50％）添加する固化目標強度が数100kgf/cm<sup>2</sup>の高強度の場合は、石灰、C A S 材のいずれの安定材とも養生初期の強度増加が大きくなり、式(5)が適合する。

## 参 考 文 献

- 1) (財)国土開発技術研究センター：廃棄物の建設事業への利用可能性に関する調査報告書、p. 78, 1982.
- 2) 河野広隆：「再生骨材を用いたコンクリートの設計施工指針（案）」について、土木施工、Vol. 27, No. 15, pp. 110～113, 1986.
- 3) 建築業協会、建築廃棄物処理再利用委員会：再生骨材コンクリートに関する研究、コンクリート工学、Vol. 16, No. 7, pp. 18～31, 1978.
- 4) 建築業協会 建築廃棄物処理再利用委員会：再生骨材および再生コンクリートの使用基準（案）、コンクリート工学、Vol. 16, No. 7, pp. 42～46, 1978.
- 5) 笠井芳夫：廃棄物の処理と資源化、セメント・コンクリート、No. 355, pp. 119～132, 1976.
- 6) 畑実：コンクリート廃材の再生技術の改善、土木施工、Vol. 27, No. 15, pp. 103～109, 1986.
- 7) 日本石灰協会、土質安定処理工法委員会：石灰による土質安定処理工法、山海堂、1970.
- 8) 土質工学会、土質試験基準検討委員会：安定処理土の締固めをしない供試体作製方法、土と基礎、Vol. 37, No. 1, pp. 77～78, 1989.
- 9) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱、p. 4, 1982.
- 10) セメント協会：セメント系固化材による地盤改良マニュアル、pp. 24, 1985.

表 - 4.3.1 コンクリート微粉末の物理的性質

比 重	2.84
ブ レ ー ン 値 ( c m <sup>2</sup> / g )	4350
砂 分 (75 μ m 以 上 ) ( % )	15.5
シ ル ト 分 (5 ~ 75 μ m ) ( % )	73.9
粘 土 分 (5 μ m 以 下 ) ( % )	10.6
D <sub>60</sub> ( m m )	0.0276
D <sub>30</sub> ( m m )	0.0123
D <sub>10</sub> ( m m )	0.0048
均 等 係 数 U <sub>c</sub>	5.7
曲 率 係 数 U <sub>c</sub> '	1.1

表 - 4.3.2 信州ロームの物理的性質

比 重	2.87
自 然 含 水 比 ( % )	86.4
強 熱 減 量 ( % )	11.6
液 性 限 界 ( % )	129
塑 性 限 界 ( % )	75.2
塑 性 指 数	53.8
砂 分 (75 μ m 以 上 ) ( % )	25.2
シ ル ト 分 (5 ~ 75 μ m ) ( % )	61.7
粘 土 分 (5 μ m 以 下 ) ( % )	13.1
D <sub>60</sub> ( m m )	0.0275
D <sub>30</sub> ( m m )	0.0132
D <sub>10</sub> ( m m )	0.0041
均 等 係 数 U <sub>c</sub>	6.6
曲 率 係 数 U <sub>c</sub> '	1.53

表－4.3.3 低強度の固化を目的としたコンクリート微粉末の配合と供試体の成形時含水比

配合記号	コンクリート 微粉末（％）	セメント （％）	C A S 材 （％）	成形時含水比 （％）
C C	——	1 0 0	——	3 5
C B C	——	9 5	5	3 5
L C 5 0	5 0	4 0	1 0	86.4
L C 5 0 C	5 0	5 0	——	86.4

表－4.3.4 高強度の固化を目的としたコンクリート微粉末の配合と供試体の成形時含水比

配合記号	コンクリート 微粉末（％）	セメント （％）	C A S 材 （％）	成形時含水比 （％）
C 5 0	5 0	4 0	1 0	4 0
C 6 0	6 0	3 0	1 0	4 0
C 6 0 C	6 0	4 0	——	4 0
C 7 0	7 0	2 0	1 0	4 0
C A	8 0	——	2 0	4 0

表－4.3.5 配合 C C 供試体に対する配合 C B C の強度比

( $q_u(\text{CBC}) / q_u(\text{CC})$ )

養生日数	C A S 材 添 加 率			
	3 %	6 %	9 %	1 2 %
3 日	6.27	1.84	1.90	1.56
7 日	4.59	2.02	1.56	1.53
2 8 日	4.88	1.85	1.07	1.23

表-4.3.6 固化処理したコンクリート微粉末の配合と適合回帰式

配合記号	安定材添加率 (%)	適合回帰式番号 (相関係数0.9以上)	回帰係数 ((5)式)		終局強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
			A 値	B 値	
C C	3	1 (0.869), 5 (0.854)	4.181	0.344	2.91
	6	4, 1, 5, 3, 2	0.543	0.075	13.3
	9	4, 5, 1, 2, 3	0.432	0.021	48.1
	12	5, 4, 2, 1, 3	0.520	0.016	60.9
C B C	3	4, 1, 5, 2, 3	0.607	0.077	13.0
	6	5, 2, 4, 1, 3	0.262	0.042	24.0
	9	5, 2, 4, 1, 3	0.168	0.028	36.0
	12	4, 5, 2, 1, 3	0.189	0.023	44.4

注) 回帰式番号

- (1)  $Y = A + B X$   
(2)  $Y = A + B \cdot \log X$   
(3)  $Y = A \cdot 10^{BX}$   
(4)  $Y = A X^B$   
(5)  $Y = \frac{X}{A + B X}$

表-4.3.7 安定材C B C中のC A S材の割合と適合回帰式

配合記号	C A S 材 添加率 (%)	適合回帰式番号 (相関係数0.9以上)	回帰係数 ((5)式)		終局強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
			A 値	B 値	
C B C	0	4, 5, 1, 2, 3	0.432	0.021	48.1
	2	2, 5, 4, 1	0.325	0.027	37.1
	5	5, 2, 4, 1, 3	0.168	0.028	36.0
	10	5, 2, 4, 1, 3	0.237	0.028	35.4

表-4.3.8 高強度材料として固化処理したコンクリート微粉末の  
配合と適合回帰式

配合記号	適合回帰式番号 (相関係数0.9以上)	回帰係数 ((5)式)		終局強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
		A 値	B 値	
C 5 0	5	0.003	0.004	277
C 6 0	5, 2, 4, 1	0.013	0.004	276
C 7 0	5, 2, 4, 1, 3	0.026	0.005	189
C 6 0 C	5, 2, 4, 1	0.017	0.004	273

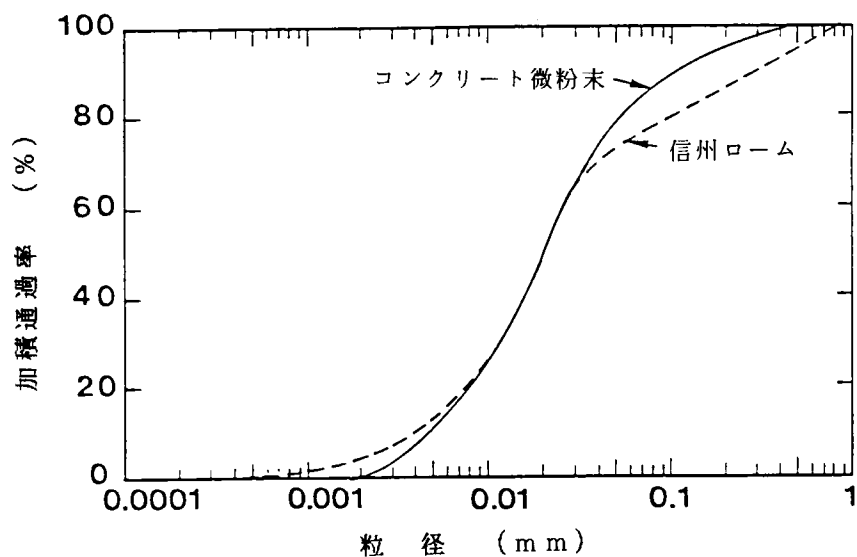


図-4.3.1 コンクリート微粉末と信州ロームの粒径加積曲線

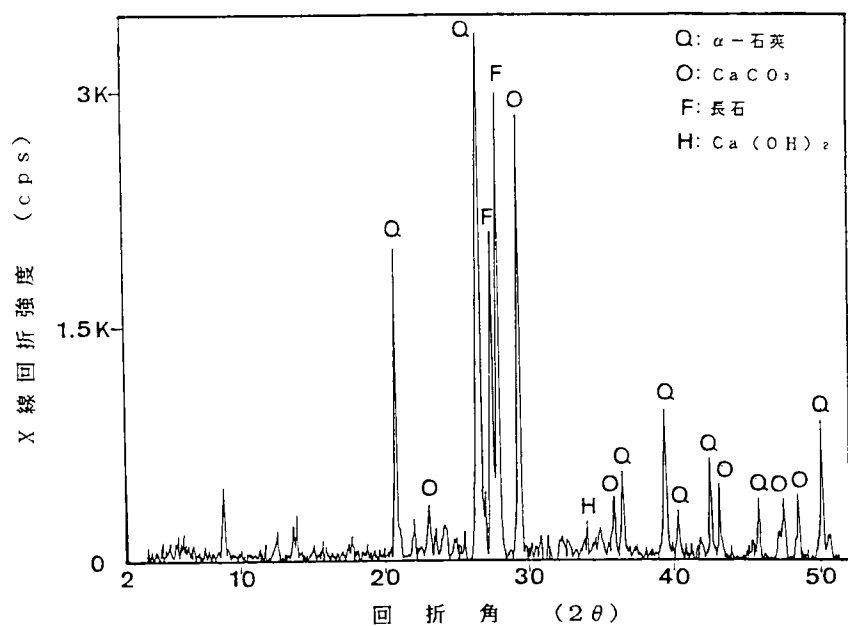


図-4.3.2 コンクリート微粉末のX線回折結果

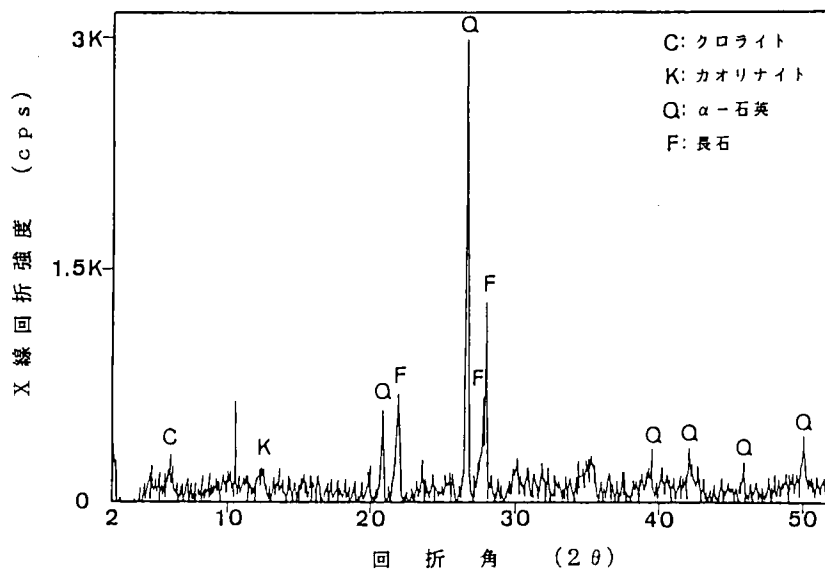


図-4.3.3 信州ロームのX線回折結果

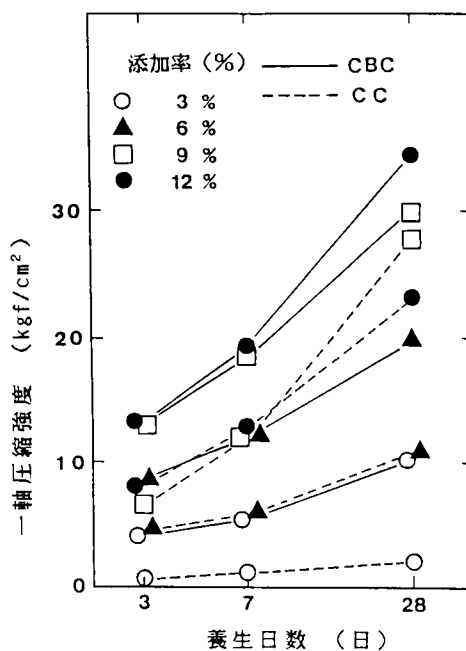


図-4.3.4 養生日数と強度の関係(CBC、CC、含水比35%)

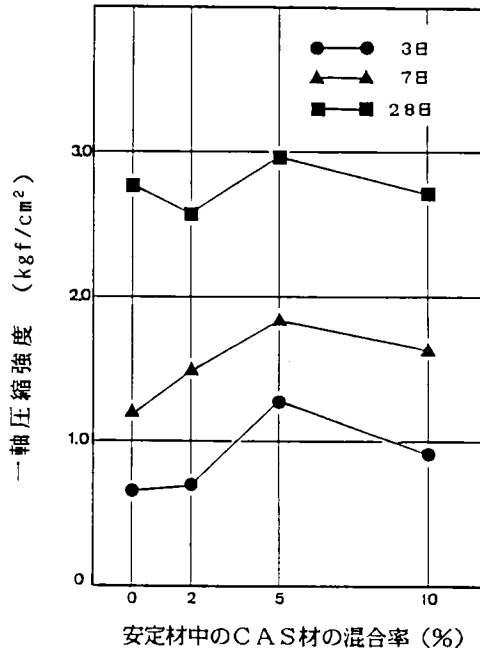


図-4.3.5 安定材中のCAS材の混合率と強度の関係  
(安定材添加率9%)

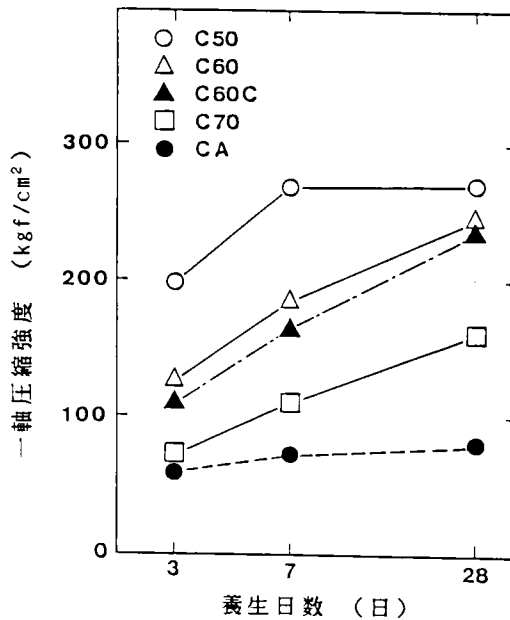


図-4.3.6 養生日数と強度の関係  
(C50, C60, C70, C60C, CA、含水比40%)



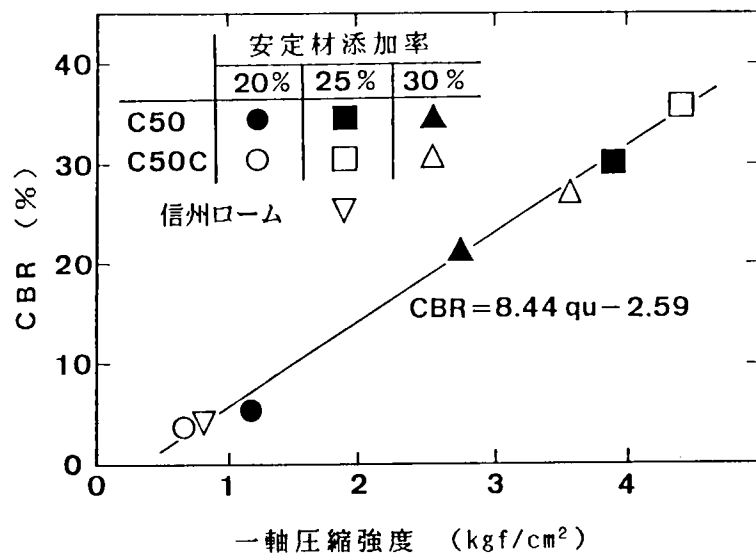


図-4.3.7 信州ローム処理土のCBRと一軸圧縮強度の関係  
(LC50、LC50C)

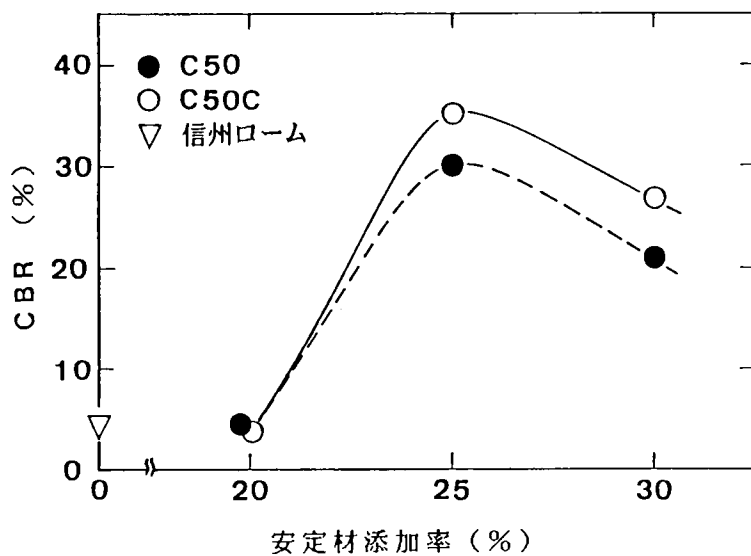


図-4.3.8 信州ローム処理土の安定材添加率とCBRの関係  
(LC50、LC50C)

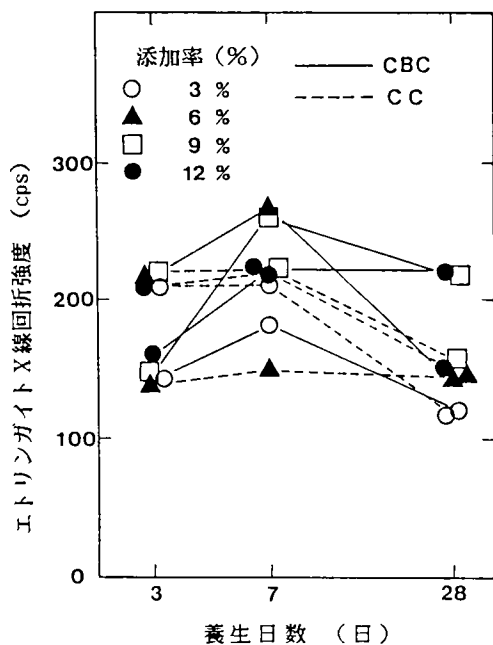


図-4.3.9 養生日数とエトリンガイトのX線回折強度の関係  
(CC, CBC)

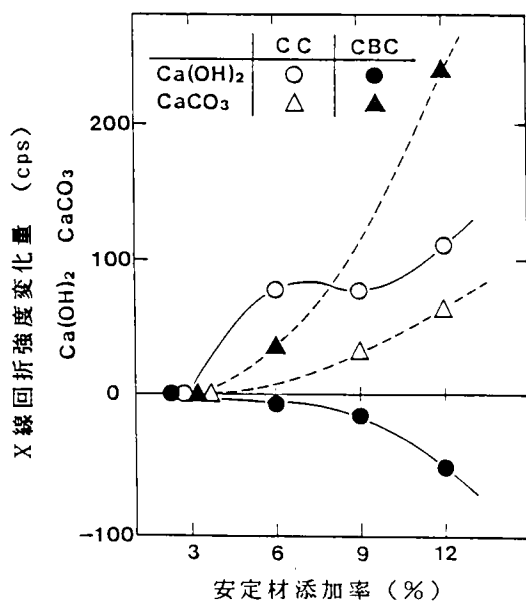


図-4.3.10 安定材添加率と反応生成物のX線回折強度の関係  
(CC, CBC、7日養生)

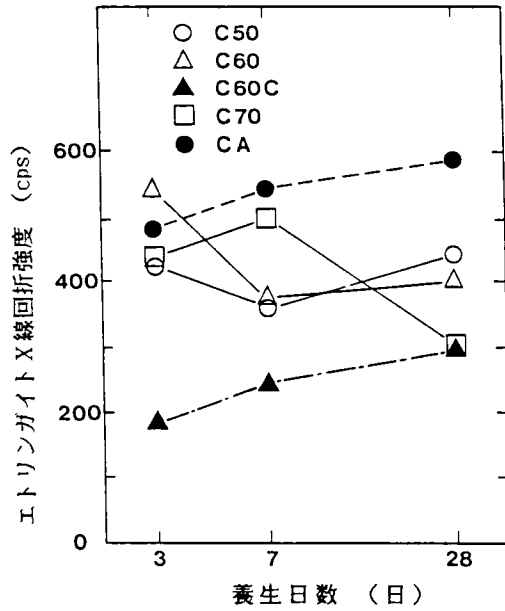


図-4.3.11 養生日数とエトリンガイトのX線回折強度の関係  
(C50, C60, C70, C60C, CA)

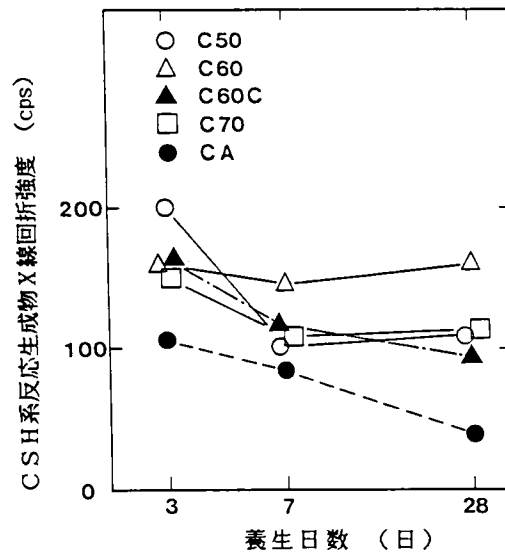


図-4.3.12 養生日数とC S H系反応生成物のX線回折強度の関係  
(C50, C60, C70, C60C, CA)

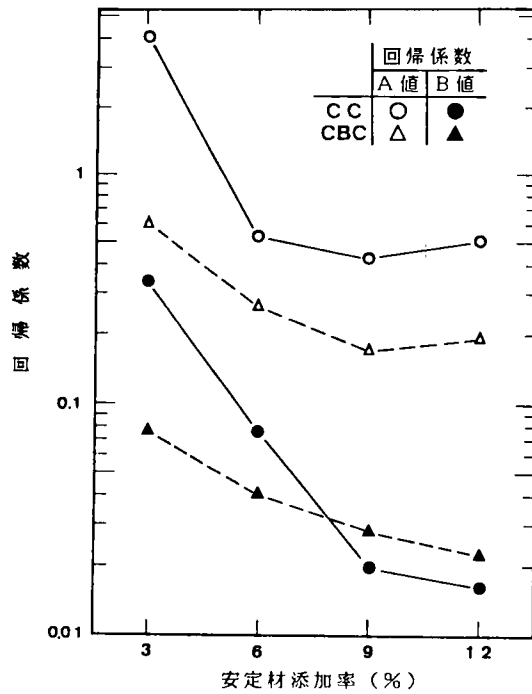


図-4.3.13 安定材添加率と回帰係数の関係 (CC、CBC、回帰式(5))

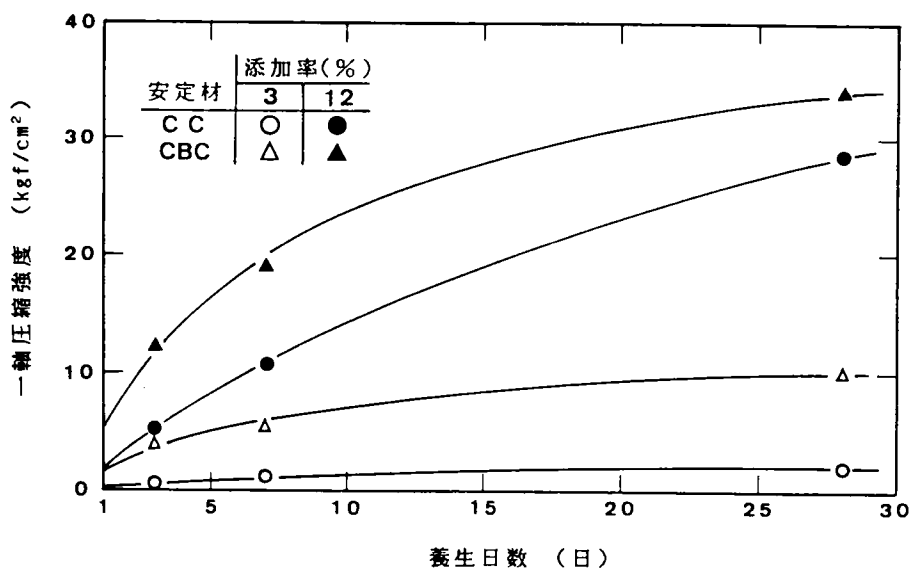


図-4.3.14 養生日数と強度の関係 (CC、CBC、回帰式(5))

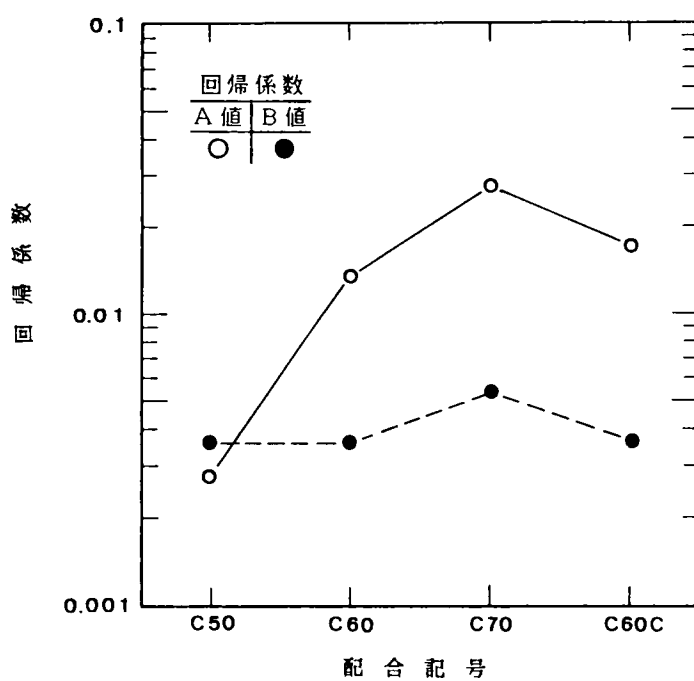


図-4.3.15 安定材の配合記号と回帰係数の関係  
(C50, C60, C70, C60C、回帰式(5))

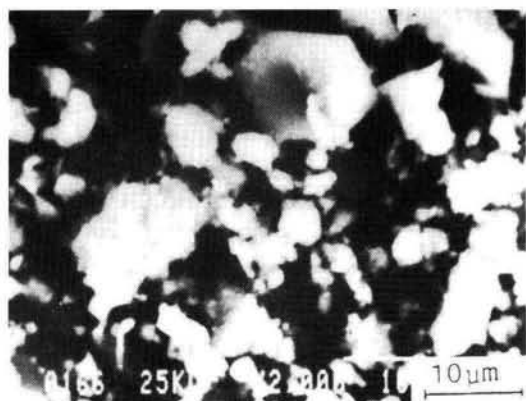


写真-4.3.1 コンクリート微粉末のSEM像

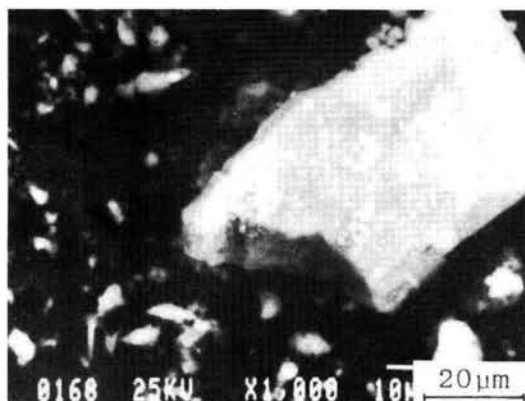
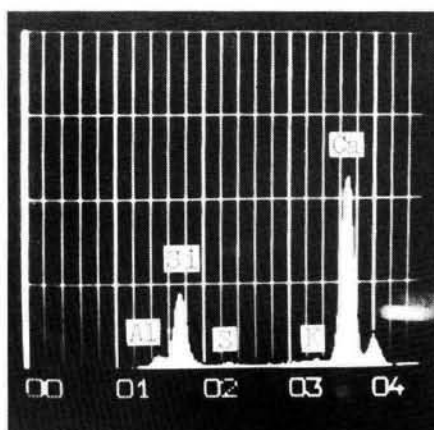


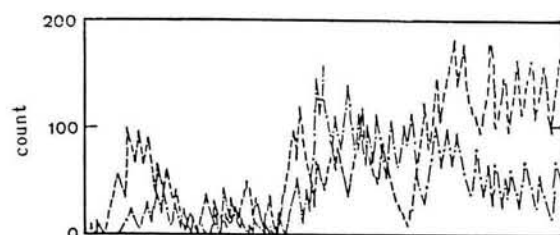
写真-4.3.2 コンクリート微粉末のSEM像



(a) SEM像



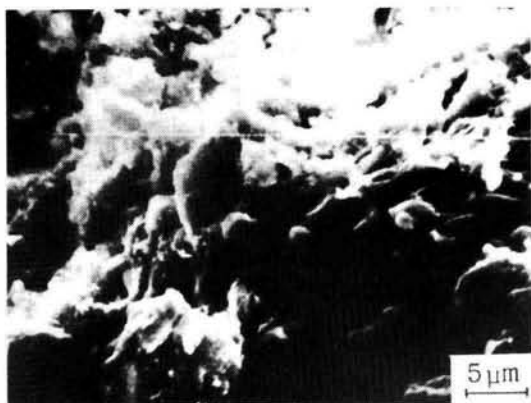
(c) 元素分析結果



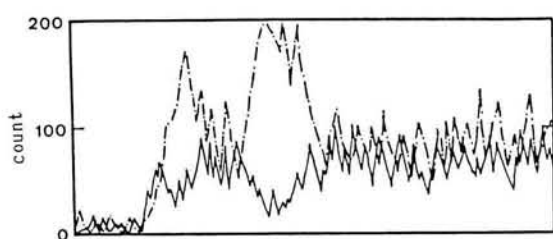
(b) 線分析結果

..... S  
 ..... Ca  
 ..... Si  
 ——— Al

写真-4.3.3 コンクリート微粉末のSEM-EDXA分析結果

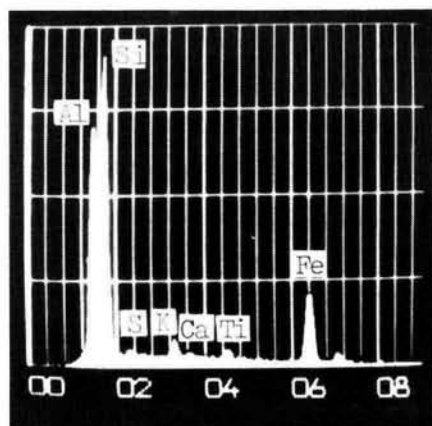


(a) SEM像



(b) 線分析結果

..... S  
 - - - - - Ca  
 - - - - - Si  
 ——— Al



(c) 元素分析結果

写真-4.3.4 信州ロームのSEM-EDXA分析結果

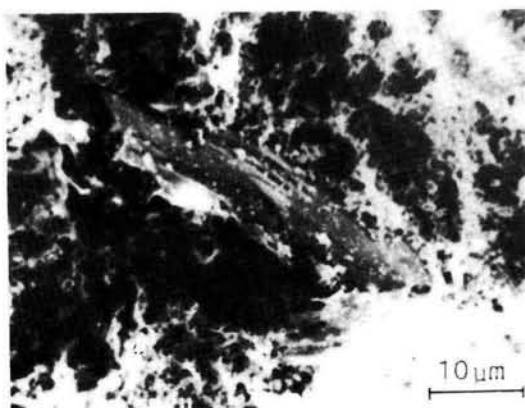


写真-4.3.5 CCのSEM像(3日養生)

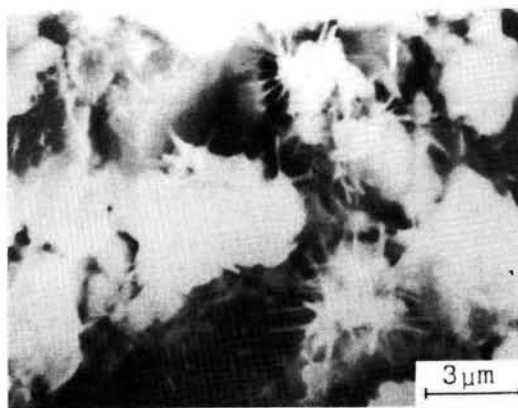
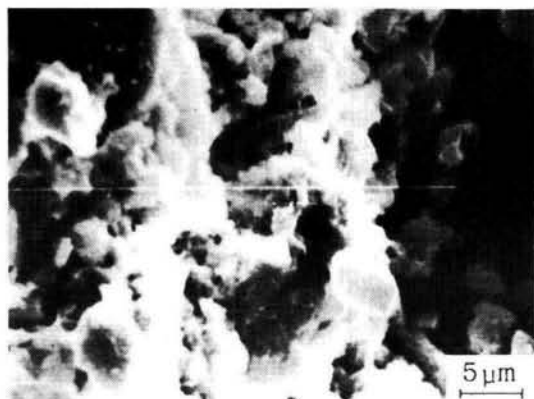
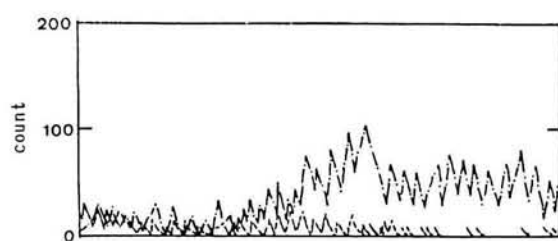


写真-4.3.6 CCのSEM像(3日養生)

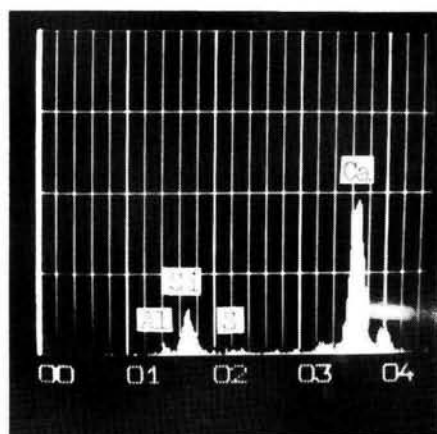


(a) SEM像



(b) 線分析結果

..... S  
 - - - - - Ca  
 ——— Si  
 ——— Al



(c) 元素分析結果

写真-4.3.7 CCのSEM-EDXA分析結果(3日養生)

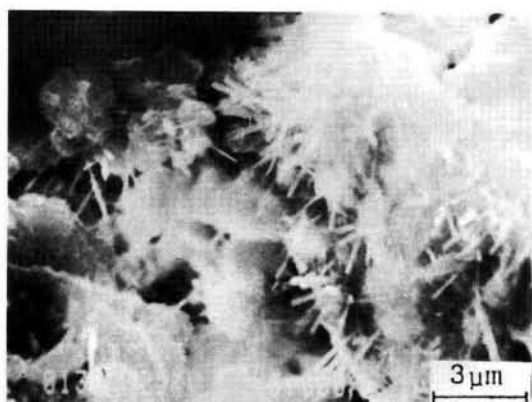


写真-4.3.8 CCのSEM像(28日養生)

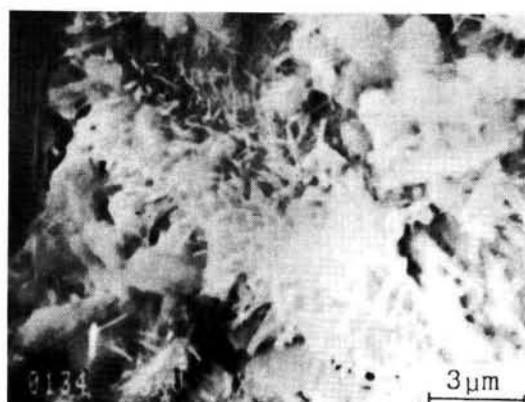


写真-4.3.9 CCのSEM像(28日養生)



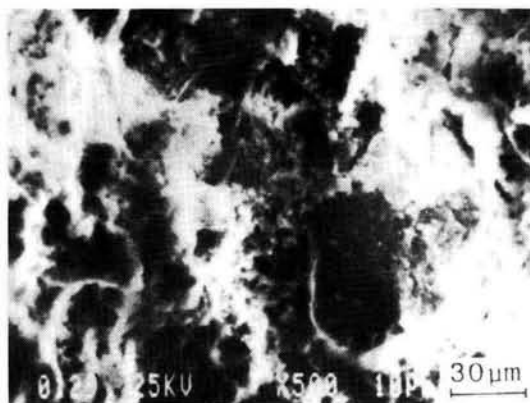


写真-4.3.10 CBCのSEM像  
(3日養生)

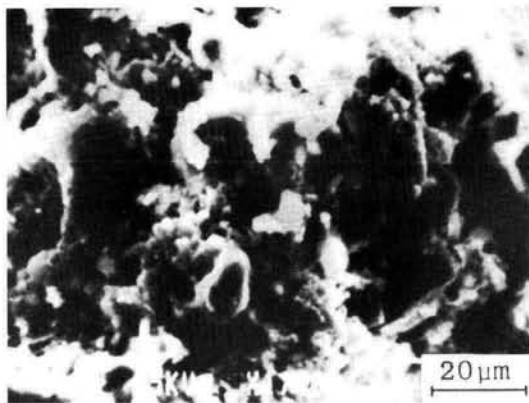


写真-4.3.11 CBCのSEM像  
(3日養生)



写真-4.3.12 CBCのSEM像  
(28日養生)

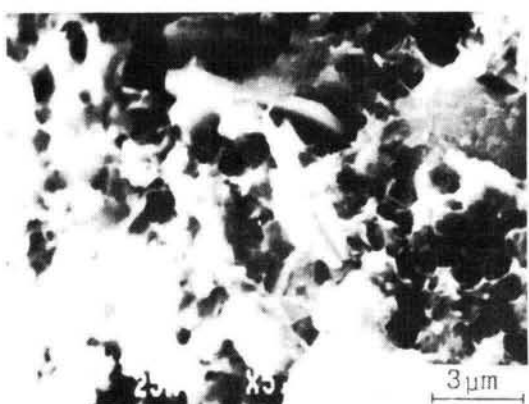


写真-4.3.13 CBCのSEM像  
(28日養生)

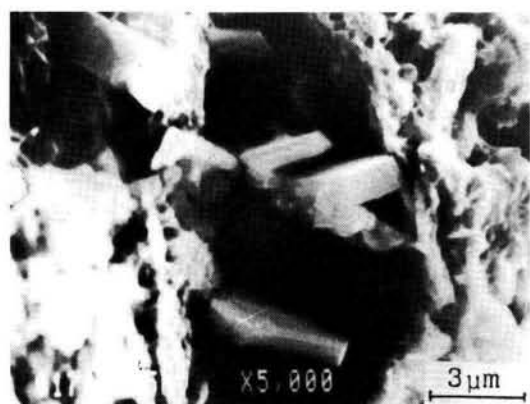
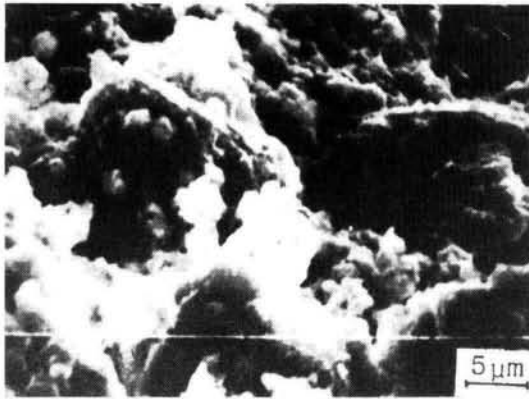


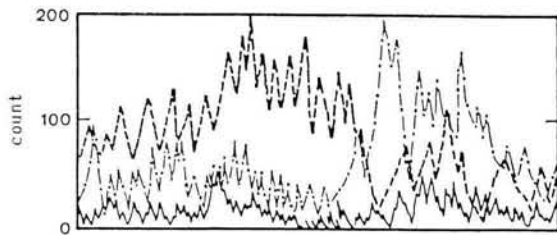
写真-4.3.14 CBCのSEM像  
(28日養生)



写真-4.3.15 CBCのSEM像  
(28日養生)

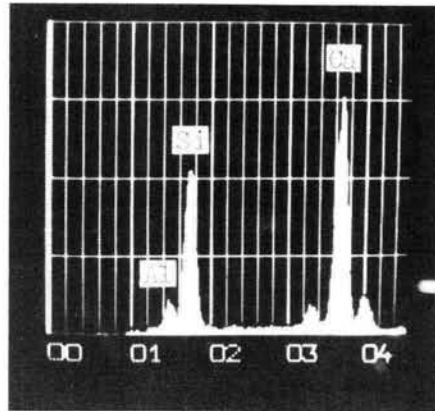


(a) SEM像



(b) 線分析結果

— S  
 - - - Ca  
 . . . Si  
 - . - Al



(c) 元素分析結果

写真-4.3.16 CBCのSEM-EDXA分析結果(3日養生)

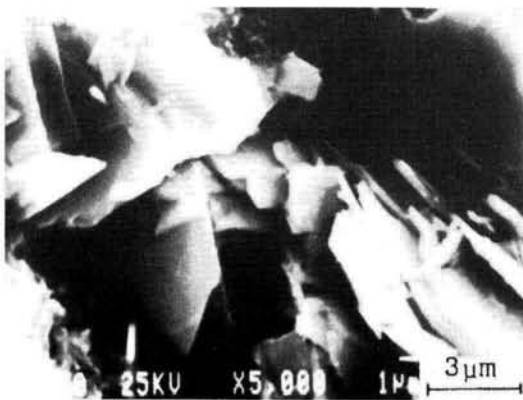


写真-4.3.17 C50のSEM像  
 (28日養生)

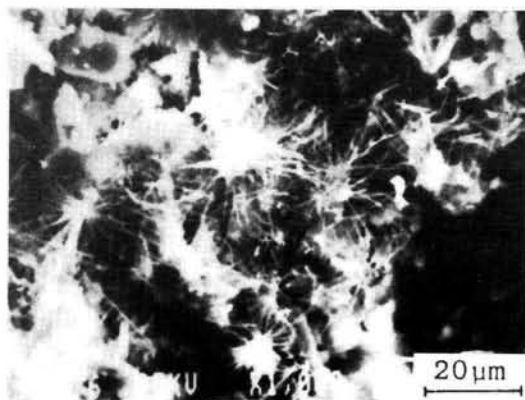


写真-4.3.18 C50のSEM像  
 (28日養生)

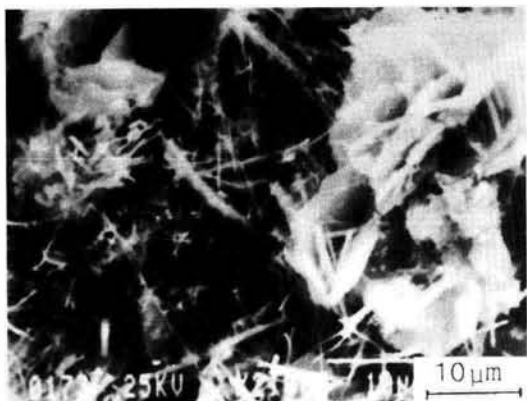


写真-4.3.19 C50のSEM像  
(28日養生)

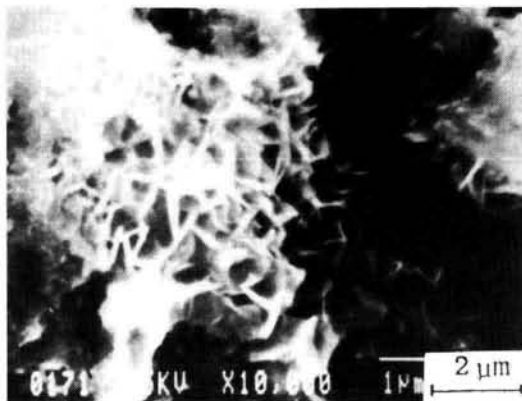
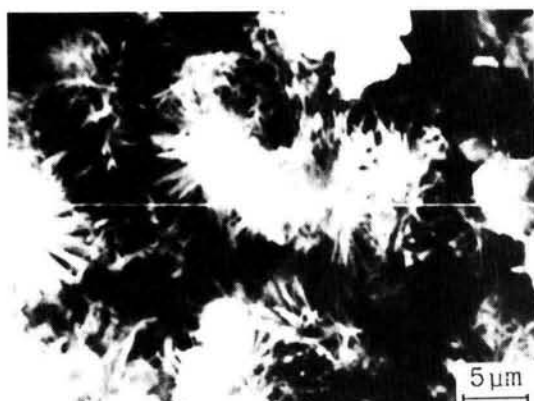
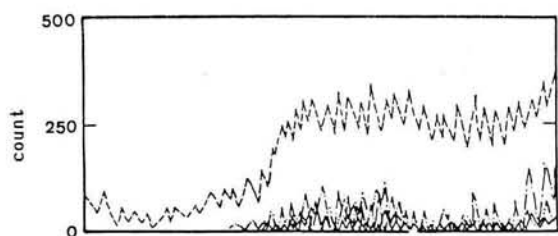


写真-4.3.20 C50のSEM像  
(28日養生)

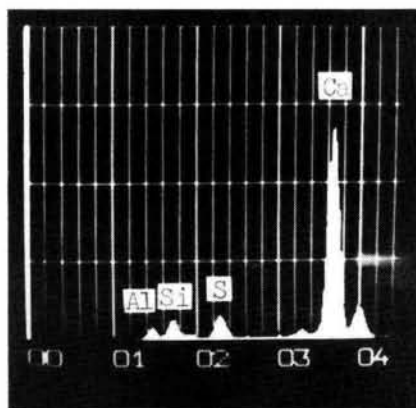


(a) SEM像



(b) 線分析結果

----- S  
----- Ca  
----- Si  
----- Al

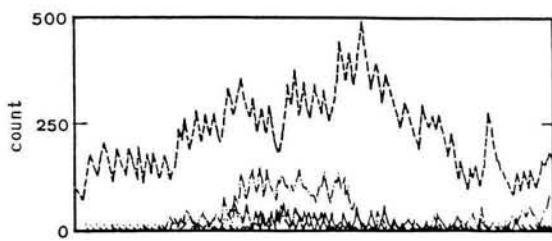


(c) 元素分析結果

写真-4.3.21 C50のSEM-EDXA分析結果  
(28日養生)

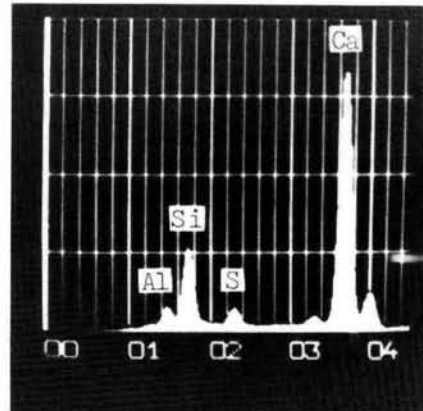


(a) SEM像



(b) 線分析結果

..... S  
 ----- Ca  
 - · - · - Si  
 \_\_\_\_\_ Al



(c) 元素分析結果

写真-4.3.22 C50のSEM-EDXA分析結果  
(28日養生)

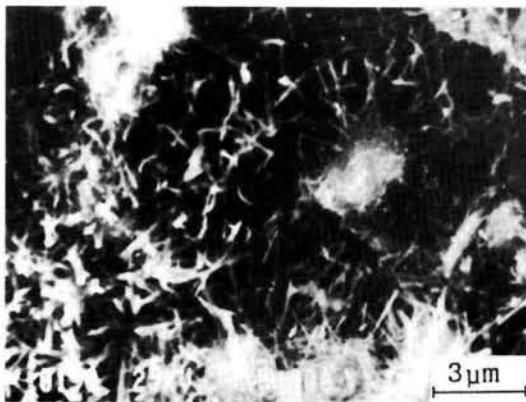


写真-4.3.23 C70のSEM像  
(28日養生)

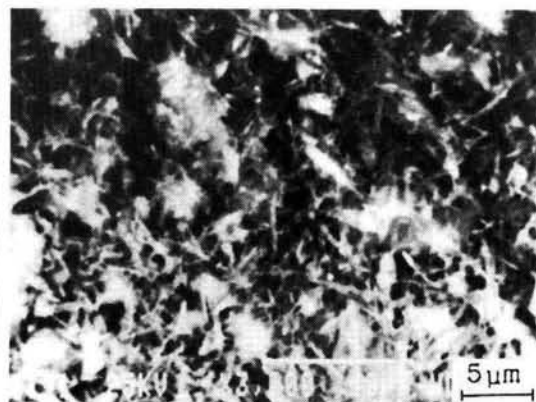


写真-4.3.24 C70のSEM像  
(28日養生)



写真-4.3.25 C70のSEM像  
(28日養生)

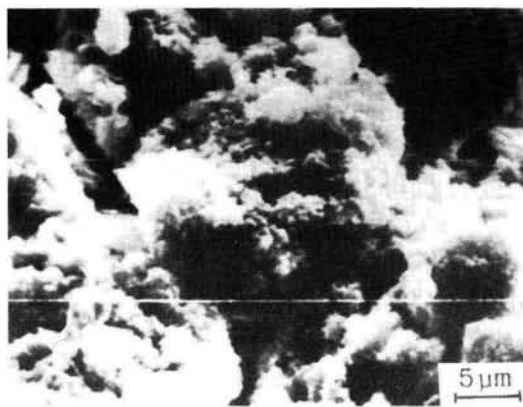


写真-4.3.26 C60CのSEM像  
(28日養生)

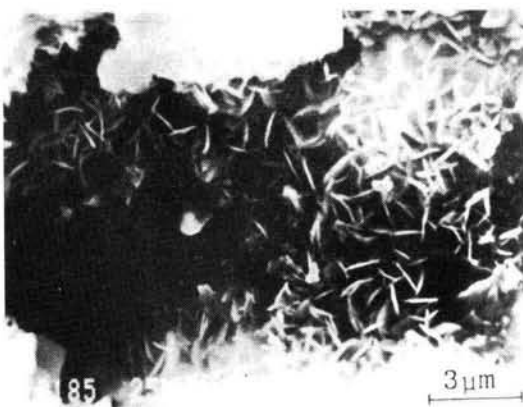


写真-4.3.27 C60CのSEM像  
(28日養生)

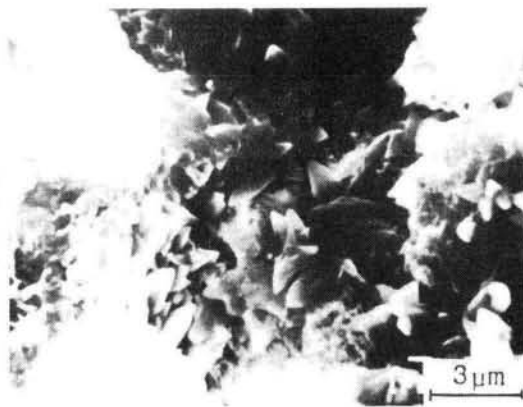


写真-4.3.28 C60CのSEM像  
(28日養生)

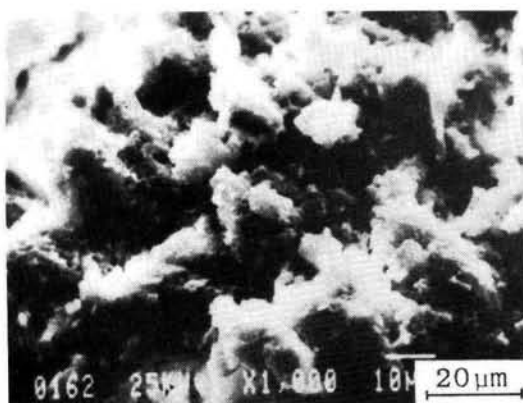


写真-4.3.29 C50で固化処理した信州  
ロームのSEM像  
(安定材添加率30%、7日養生)

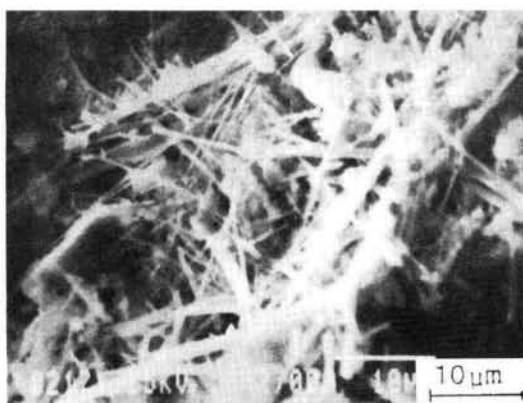


写真-4.3.30 C50Cで固化処理した  
信州ロームのSEM像  
(安定材添加率20%、7日養生)

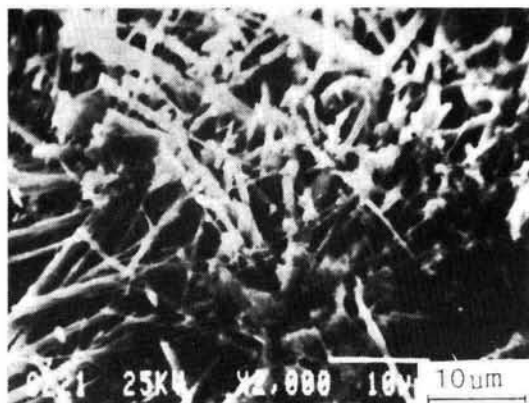


写真-4.3.31 C50Cで固化処理した  
信州ロームのSEM像  
(安定材添加率20%、7日養生)

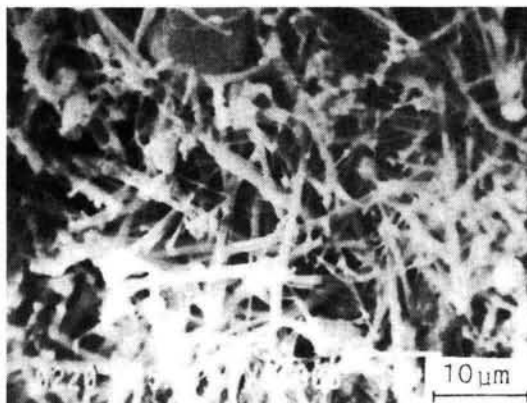


写真-4.3.32 C50Cで固化処理した  
信州ロームのSEM像  
(安定材添加率20%、7日養生)

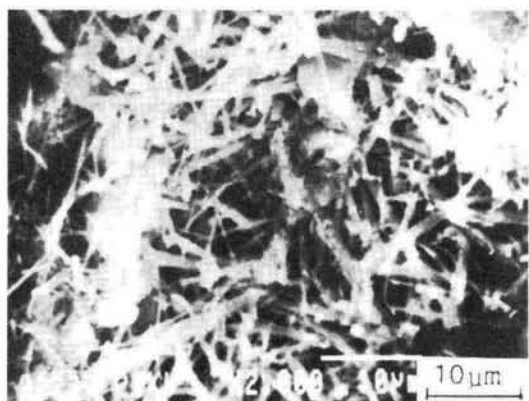


写真-4.3.33 C50で固化処理した信州  
ロームのSEM像  
(安定材添加率20%、7日養生)

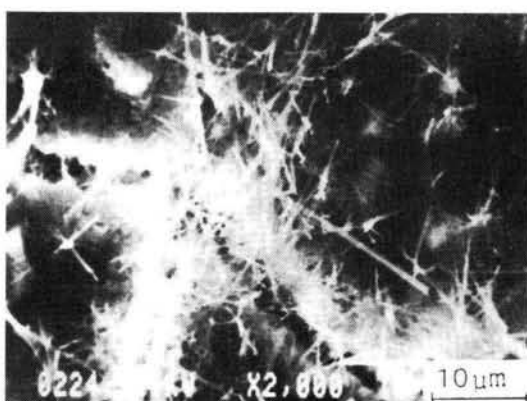


写真-4.3.34 C50で固化処理した信州  
ロームのSEM像  
(安定材添加率20%、7日養生)

#### 4. 4 製紙焼却灰の石灰・セメント系安定材による固化処理に関する研究

##### 4. 4. 1 概 説

製紙産業は産業や文化の発達とともに飛躍的に盛んになり、一般紙の生産量は1986年に1200万トン余になり毎年確実に増加している。また、日本各地で地域の特色を生かして行われている地場産業でもある。

製紙産業は主として木材チップ、および古紙を原料として紙を製造するものであり、パルプ化するための添加薬剤や目止め材として白土やタルク、白亜などの天然品や硫酸カルシウム、炭酸塩などの薬品を使用している。そして、排水処理の際には繊維質のペーパースラッジを多量に発生する。静岡県では富士市および富士見市を中心に紙の生産を行っており、現在のペーパースラッジの排出量は静岡県全体で年間約77万トンにのぼっている。また、昭和61年度の富士市工業課の調査によると、排出されるペーパースラッジの約90%が焼却処分されており、焼却によって75%減量されているとはいえ、その残滓である焼却灰は約400トン/日発生し続けている。それらの焼却灰は肥料の原料やアスファルト充填材、および建築ボード増量材などに有効利用されている<sup>1)</sup>が、その使用量はわずか3%にすぎない状況である。そして、残りの大部分の焼却灰は埋立て処分されているが、現在では処分地の確保も困難な状況であり、有効な利用方法の開発が緊急の課題となっている。

製紙焼却灰の物理、化学的性質は焼却前のペーパースラッジの種類により大きな違いがみられる。ペーパースラッジには木材チップからパルプを製造する際のパルプ系スラッジ、パルプから上質紙やクラフト紙を製造する際の一般製紙スラッジ、および古紙を主原料としている古紙系スラッジなどがある。焼却灰はペーパースラッジ中の微細繊維を燃焼させた残滓であり、パルプ系スラッジの焼却灰はパルプの無機成分やチップ蒸解薬剤および排水処理無機添加材から成っている。また、上質紙製造工場ではクレー（カオリン）、タルク、炭酸カルシウムなどの顔料、そして、古紙系では古紙中の顔料や塗工用の顔料などで構成されている。各スラッジの強熱減量はパルプ系で約83～84%、一般製紙スラッジで約60～63%、また古紙系では45～60%であり、その残分が焼却灰の発生量である。焼却灰の化学組成は厳密には工場や原料毎に異なるが、一般的にクレー（カオリン）の組成（ $\text{SiO}_2$ が50～60%、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ が10～30%、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ と $\text{MgO}$ が各々1～数%）とよく似ている<sup>2)</sup>。表-4.4.1は主製品が洋紙系、古紙系、クラフト系の各工場から発生した焼却灰の化学成分である<sup>3)</sup>。洋紙系と古紙系は主成分の値はよく似ているが、クラフト系のものは $\text{Al}_2\text{O}_3$ と $\text{CaO}$ の割合が大きく、逆に $\text{SiO}_2$ が小さくなっており、他の2つと異なった化学的性質を持っている。しかし、いずれもAlやCa成分を多く含有しており、

また、細粒子のため比較的硬化活性が高く安定処理試料として優れた特性を持っているものと考えられる。

本節は、現在、処理方法や処分地の確保が大きな問題となっている製紙焼却灰を石灰・セメント系安定材を用いて固化処理し（以後、処理灰と呼ぶ）、安定材添加量の違いや成形時含水比と締固めエネルギーの違いによる固化効果を検討する。また、安定処理灰の現場での施工を考えると、処理灰の加水混合から打設までに長時間を要する場合が少なくない。その際には処理灰の練り返しを行ってから型枠などに打設するのが普通であり、硬化反応が始まった後の練り返しが固化効果に与える影響について追究している。そして、それらの結果より焼却灰の建設材料としての有効利用の可能性を検討している<sup>4)</sup>。

#### 4. 4. 2 材料特性と実験概要

実験試料は富士市桑崎の家庭用紙工場を主体とした39社で構成されている富士製紙協同組合の、流動床の焼却炉から発生したペーパースラッジの焼却灰であり、粗大粒子などを除いた5 mm以下のものを用いた（写真－4.4.1, 2）。図－4.4.1に粒度分析の結果を、また、表－4.4.1, 2に化学成分と物理的性質を示している。この焼却灰はブレン値が約700cm<sup>2</sup>/gであり、一般的にセメントの粒子より細かいといわれている焼却灰の中では粗粒のものであり、硬化活性の点では品質の悪いものといえる。また、粒度分析の結果では均等係数が8.1、曲率係数が1.1であり、粒度分布の良い試料である。一方、化学成分としては製紙焼却灰の一般的なもので、SiO<sub>2</sub>を43.6%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を25.3%、CaOを12.7%含有しており、特に、硬化活性の点よりAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>とCaOの多い点が注目される。蛍光X線およびX線回折の結果によると、Si、Al、Ca、Fe、Zn、Tiなどの元素の存在が確認され、結晶鉱物としては灰長石と石膏が大きなピークを示している（写真－4.4.3、図－4.4.2）。ところで、これらの工場から廃棄される焼却灰の品質は非常に安定しており、ほとんど変化がないことが確かめられている<sup>5)</sup>。

安定材は表－4.4.3に示すように、普通ポルトランドセメント（以下、セメントと呼ぶ）とセメントに消石灰、硫酸アルミニウム、炭酸ナトリウムを混合した炭酸アルミネート系塩材料（以下、C A S材と呼ぶ）の2種類を用いた。供試体は焼却灰の乾燥質量に対し、安定材を5%、10%、20%、30%の4とおりを添加した後、含水比を40%（最適含水比）、60%、80%に調節し、40%、60%のものはJIS A 1210の第一方法と同じエネルギーで締固めた。また、含水比が80%のものは液性限界より約10%高いため流動性に富んでおり、空隙ができないように振動を与えて直径5 cm、高さ10 cmのモールドに詰めた。養生は高分子フィルムで密封し、20℃、90%の恒温恒湿室にて所定日数行い、一軸圧縮試験を行った。



また、繰り返した処理灰の強度発現への影響について検討するため、加水混合後、密封容器で2時間保存し、処理灰をもう一度繰り返して成形し、繰り返しを行わないものと同様の強度試験を行った。

#### 4. 4. 3 石灰・セメント系安定材による製紙焼却灰の強度特性

図-4.4.3～7は安定材を5%、10%、30%添加した供試体の養生日数に対する強度変化を示している。また、図-4.4.8, 9は供試体の成形時含水比と強度との関係である。安定材を5%添加した図-4.4.3によると養生の経過とともに強度が発現していることがわかる。また、C A S材を添加した供試体は養生日数や成形時含水比に関わらずセメントを添加したものに比べ、1.3～2.0倍の大きな強度になっており、安定材を少量添加したときの固化効果の良さを示している。次に、セメントを10%、30%添加した図-4.4.4, 5によると、全ての成形時含水比で長期の養生に伴う強度の増加が顕著となり、製紙焼却灰の化学成分による硬化活性の良さを示している。そして、供試体の成形時含水比が80%に比べ、60%、40%と少なくなるに伴い大きな強度を示している（図-4.4.6）。また、処理灰の加水混合2時間後に繰り返し、成形を行った供試体による強度試験の結果では、繰り返しを行わなかったものに比べ、ほとんど同じか、むしろ、それ以上の強度を示している。

一方、安定材にC A S材を10%用いた図-4.4.7ではセメント単独のものに比べ、1～7日養生の初期強度の大きいことがわかる。しかし、長期養生の強度の伸びは小さくなっている。成形時含水比との関係をみると、セメントと同様、低含水比の方が高い強度を示している。そして、繰り返しによる影響はセメント同様ほとんどみられない。次に、C A S材添加率が30%のもの（図-4.4.8）では、養生の経過に伴い強度は増加しているものの、添加率が10%のものと同様、7日養生以後の強度の伸びは減少している。そして、最も強度の大きな供試体は成形時含水比が60%のものであり、40%のものは長期養生の強度の伸びが小さく、91日養生後の強度では80%のものと似た値になっている。また、繰り返しを行った供試体では成形時含水比が80%のものは繰り返さない供試体とよく似た強度を得ているが、成形時含水比が40%、60%のものは繰り返し強度が低下しており、特に、40%では、非繰り返しに比べ約4割程度の強度になっている（図-4.4.9）。

次に、安定材添加率と強度の関係を図-4.4.10, 11に示している。どちらの安定材でも添加率の増加に従い強度は確実に増加している。安定材にセメントを使用したものは添加率の増加に比例して強度が増加している。一方、C A S材を用いたものでは安定材添加率が20%を越えると、特に、長期の養生で強度増加の程度が小さくなっていることがわかる。また、添加率の

高い20%、30%では成形時含水比60%のものが40%のものより大きな強度になっている。これらの成形時含水比と強度低下の関係は添加率の多い20%、30%において、成形時含水比の小さな40%の配合だけにみられる現象である。つまり、C A S材を添加した処理灰の強度増加には供試体中に存在する水分量の関係の大きいことがわかる。

図-4.4.12, 13は供試体の成形時含水比と乾燥密度の関係である。全体として成形時含水比の低下とともに乾燥密度が大きくなっており、少ない成形時含水比ほど高い強度になった結果を裏づけている。しかし、C A S材を用いた添加率が20%、30%、成形時含水比40%の処理灰では乾燥密度は成形時含水比が60%のものと変わらないものの、強度は減少しており、安定材の硬化反応が進んでいないことを示している。また、練り返しを行った供試体の乾燥密度も練り返しを行わないのものに比べ、若干大きくなっており、強度発現と同じ傾向を示している。特に、セメントを添加したものはその傾向が大きくなっている。しかしながら、C A S材を添加した処理灰では成形時含水比が60%から40%に減少すると乾燥密度が低下している。特に、C A S材添加率が30%の乾燥密度の低下量は大きくなっており、供試体中の水分不足による硬化反応の不足と相まって長期養生の強度増加が小さくなったものである。

図-4.4.14は二種類の安定材のうち、長期養生で最も固化効果の大きな成形時含水比が60%の養生日数に対する強度変化を示している。セメントを用いたものは91日までの長期にわたる強度の伸びがみられる。一方、C A S材を添加した処理灰は長期強度はセメントより小さい値になっているが、7日養生までの初期強度はセメント処理した供試体に比べ1～数倍の大きな強度になっている。これはC A S材の添加により硬化反応物の生成が極く短期間の内に進行したことを示している。これらの処理灰を大量消費の面より道路用材としての適用を考えてみると、下層路盤材として7日養生で10kgf/cm<sup>2</sup>の規格に対し、C A S材では約10%、セメントでは約14%の添加率で強度基準を満足しており、長期にわたる強度の増加と合わせ焼却灰を路盤材料として使用することが可能である。また、安定材にC A S材を用いるとセメントに比べ、約2/3の添加量でよいことになり、C A S材の使用は安定材の節約になる。

表-4.4.4は安定材を添加した処理灰を3日間20℃で養生し、4日間水浸した後にC B R試験を行った結果である。C A S材がセメントに比べ、高い固化効果を示している。また、成形時含水比が40%のC B Rに比べ、60%のものは大変小さな値になっており、C A S材の使用では一軸圧縮試験と逆の結果を示している。これは締固めエネルギーの違いによるものであり、JIS A 1210の第2方法で締固められたC B R供試体の乾燥密度は、図-4.4.12, 13の中に示しているように含水比が60%ではオーバーコンパクションとなり、低い乾燥密度になった結果、C B Rが小さくなったものであり、締固めの重要性を示している。

以上の結果、安定材としてセメントを用いた処理灰では成形時含水比の低下、および練り返

しを行うと供試体の乾燥密度が増大し、強度は長期にわたり増加することが明らかになった。一方、C A S 材の使用では養生初期の強度発現が顕著であるが、長期の強度増加には供試体中の水分量が重要となり、特に、安定材添加量の多い場合、および練り返し処理灰では含水比の不足による硬化反応の不完全や乾燥密度の低下が長期の強度発現の阻害要因になることがわかった。

#### 4. 4. 4 電子顕微鏡による固化処理した製紙焼却灰の反応生成物の観察

固化処理した製紙焼却灰の反応生成物、および微視的構造の追究のため電子顕微鏡による観察を行った。なお、加水混合から2時間後の練り返しの有無は、観察結果に有意な差がないため、ここでは練り返しを行わない処理灰について考察を行う。

写真-4.4.4はセメントを10%添加し、成形時含水比が40%で固化処理した製紙焼却灰の7日養生後のものである。焼却灰の粒子の輪郭は比較的明瞭であり、表面は極く小さな粒子のCa成分や反応生成物が付着している。そして、91日養生後には処理灰の表面はほとんど反応生成物で覆われており、微小なトゲ状のエトリンガイトやC S H系反応生成物が見られ、モノサルフェートのような薄い花卉状の結晶もみられる（写真-4.4.5）。また、成形時含水比の多い80%のものでは反応性がよいためかエトリンガイトの結晶が大きく成長している（写真-4.4.6）。一方、セメントの添加量が30%の写真-4.4.7, 8では7日養生で処理灰の表面は箔状のC S H系反応生成物やエトリンガイトで覆われ焼却灰粒子はほとんど見えなくなり、硬化反応が顕著であることを示している。そして、硬化反応性の高い含水比が80%の91日養生の処理灰では針状のエトリンガイトはほとんど見られなくなっている。そして、焼却灰粒子間の空隙は箔状や網目状のC S H系反応生成物、六角板状のC A H系反応生成物および $\text{Ca(OH)}_2$ や $\text{CaCO}_3$ で覆われ、供試体が一体化し剛性が増加したことがわかる（写真-4.4.9）。しかし、供試体成形時に締固めを行っていないため、処理灰中の空隙は大きなものがみられる。

次に、C A S 材を10%添加し、成形時含水比が60%の28日養生した処理灰が写真-4.4.10である。セメントと同様、小さなエトリンガイトなどが見られるが、その生成量はわずかである。そして、7日養生の成形時含水比が80%の写真-4.4.11, 12ではエトリンガイトの成長は著しく、焼却灰粒子相互を固結している様子がみられる。一方、C A S 材添加量を30%に増加したものではエトリンガイトの生成量はさらに多くなり、処理灰の空隙を埋め尽くしている（写真-4.4.13）。また、長期の養生ではエトリンガイトとともに、その表面をC S H系や板状のC A H系反応生成物が覆い、強度増加を促進しているものと考えられる（写真-4.4.14, 15）。

以上の結果、セメントやC A S 材の添加によりエトリンガイトやC S H系の硬化反応物の生

成が極く短期養生の間に進行することがわかった。また、長期養生ではセメントの水和によって得られる石灰分との反応により  $\text{C-S-H}$ 、 $\text{C-A-H}$  系反応物や  $\text{CaCO}_3$  が多く生成する。そして、生成された反応生成物が焼却灰粒子間の空隙を埋め強度の増加に貢献するものである。ところで、この長期にわたる強度増加は一般の安定処理土に見られないものであり、表-4.4.5に示すように製紙焼却灰の溶出性の高い  $\text{Al}$  成分の影響と考えられる。また、 $\text{C-A-S}$  材中にはエトリンガイトを生成する反応性元素が多く、安定材添加率の高い処理灰ではエトリンガイト生成量が特に多くなる。しかしながら、成形時含水比の少ない処理灰ではエトリンガイトの生成量は少なくなっており、処理灰中の水分量が不足するため添加した石灰などが未反応で残留し、長期強度が増加しなかった原因と考えられる。このことは長期養生の硬化反応には処理灰中の水分量が重要であることを示している。

#### 4. 4. 5 石灰・セメント系安定材による製紙焼却灰の強度発現の定式化

表-4.4.6 は固化処理した製紙焼却灰の一軸圧縮試験の結果を供試体の養生日数 ( $X$ ) と強度 ( $Y$ ) の関係について 2 章 2. 2 に示した 5 種類の回帰式にあてはめた結果である。ここで回帰に用いたデータは 1、3、7、28、91 の養生日数について、それぞれ 3 個の強度試験の結果である。

製紙焼却灰は 4 章 4. 2 で検討したフライアッシュと同様、硬化活性の高い細粒分の多い処理対象試料である。そして、使用した安定材に対して適合する回帰式を相関係数の平均値より求めると、 $\text{C-A-S}$  材を添加したものでは締固めの有無に関わらず相関係数が 0.97 以上の式(5)が最も適合している。一方、セメントを用いたものは処理灰を締固めた場合は式(2)、式(5)が、また、締固めない場合は長期の養生にわたり強度が増加する式(4)が適しており、製紙焼却灰とフライアッシュの回帰式はほぼ同様の関係になっている。しかしながら、高強度材料を目標とした処理灰の強度を  $\text{C-A-S}$  材添加率 30% で比較すると、安定材中のセメント量は製紙焼却灰が 22.5%、フライアッシュが 24.0% とほとんど変わらないのに比べ、製紙焼却灰の強度は反応性の低いフライアッシュ・国外炭の約半分程度になっている。これは製紙焼却灰とフライアッシュの化学成分の違いによるものと考えられ、製紙焼却灰の  $\text{Al}$  成分の溶出量はフライアッシュの約 10 倍になっているのが特徴であり、 $\text{C-A-H}$  系反応物などの生成は顕著であるが、強度増加への貢献が小さい結果と考えられる。

次に、強度発現の比較のため回帰式(5)を用いて検討を行う。

図-4.4.15, 16 は安定材添加率と式(5)で求めた回帰係数の関係を示している。また、図-4.4.17, 18 は成形時含水比と回帰係数のものである。安定材としてセメントを添加した図-4.

4.15, 17によると、安定材添加率の増加、および供試体成形時含水比の低下に伴い回帰係数 A 値、B 値はどちらも減少傾向を示しており、養生初期から長期にわたる強度増加が大きくなっている。しかし、セメント添加率30%においては、成形時含水比80%処理灰の係数 B 値は40%、60%に比べ小さくなっており、終局強度の推定値として  $1/B$  の値を比べると、強度試験と異なる結果を示している。この原因は式(5)の相関係数が小さいためである。図-4.4.19はセメント添加率30%、成形時含水比40%の処理灰の養生日数と強度の関係を比較的適合性のよい式(2)、式(4)、式(5)で示したものである。実験で得られた強度は養生初期から長期にわたり式(2)と良い適合を示している。しかし、これを式(5)で表すと91日の長期養生強度に比べて、28日までの養生初期の強度増加が小さく、その後も製紙焼却灰のポズラン活性が良く、強度増加を持続するため適合性は悪くなっている。その結果、91日養生後の強度は回帰式による推定値と良く合っているが、長期強度を示す係数 B 値は小さくなり、終局強度として用いた  $1/B$  の値は実験結果と比べ、かなり大きな違いとなり、この回帰係数を強度の比較検討に用いるのは困難なようである。

一方、安定材に C A S 材を用いた処理灰（図-4.4.16, 18）でも安定材添加率が増加するに従い、また、供試体成形時含水比が減少するに従い強度は増加しており、セメントと同じ傾向を示している。そして、表-4.4.6より式(5)は養生に伴う強度発現を精度良く表していることがわかる。しかし、安定材添加率が30%の成形時含水比40%では係数 B 値が60%より大きくなっており、長期の強度発現に問題のあったことがわかる（図-4.4.20）。

以上の結果、製紙焼却灰の安定処理において、安定材として C A S 材を用いた処理灰の養生に伴う強度発現は、締固めの有無に関わらず回帰式(5)が適している。

$$Y = \frac{X}{A + B X} \quad (5)$$

ここで、Y : 一軸圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

X : 養生日数 (日)

A、B : 回帰係数

一方、安定材としてセメントを使用し、締固めた処理灰では養生初期の強度と長期養生の強度の関係から式(5)では回帰係数による強度の比較検討が困難であり、式(2)が最もよく適合し（表-4.4.7）、また、締固めない処理灰では式(4)が最も精度よく適合していることがわかった。

$$Y = A + B \cdot \log X \quad (2)$$

$$Y = A X^B \quad (4)$$

#### 4. 4. 6 本節のまとめ

製紙焼却灰を普通ポルトランドセメントと、セメントに消石灰、硫酸アルミニウム、炭酸ナトリウムを混合したC A S材を用いて安定処理を行い、建設材料などへの有効利用を目的として固化特性を追究した。得られた結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 安定材の固化特性として、セメントは水和反応、および水和反応により生成された石灰と焼却灰との反応により長期にわたる強度の増加がみられ、大きな強度が得られる。一方、C A S材は養生初期の強度発現が顕著であり、特に添加率の小さい処理灰ではセメントに比べ、養生初期から長期に至るまで大きな強度になる。
- (2) 安定材添加率5～30%、成形時含水比40～80%の範囲において、セメント処理灰はセメント量の増加、および成形時含水比の減少により乾燥密度が増加し、大きな固化効果が得られる。しかし、C A S材では添加量の増加により高強度が得られるが、成形時含水比の減少はエトリンサイトなどの硬化反応のために必要な水分が不足し、強度の減少もみられ、C A S材添加量に応じた最適な成形時含水比が存在する。本研究のC A S材添加量が30%では最適成形時含水比は約60%である。
- (3) 加水混合2時間後の練り返しによる影響は、処理灰中に締固めや、安定材の硬化反応に必要な水分量があれば2時間までは影響はない。しかし、処理灰中の水分が不足する場合は練り返し後の締固めにより乾燥密度が低下し、硬化反応も進まないため長期にわたる強度増加は得られない。
- (4) 硬化反応生成物は養生初期ではC S H系反応生成物とエトリンサイトが主なものであり、長期養生ではC S H系やC A H系反応生成物、およびモノサルフェートなどであり、長期強度の増加に貢献している。
- (5) 製紙焼却灰は溶出性の良い硬化反応性元素を含有し、耐久性の検討が必要であるが、C A S材を10%、あるいはセメントを14%程度添加することにより下層路盤として使用でき、道路材料や建設材料などとして有効利用が可能である。
- (6) 製紙焼却灰は硬化活性の高い細粒分の多い処理対象試料であり、フライアッシュと同様の固化特性を有している。安定材としてC A S材を用いた処理灰の養生に伴う強度発現は締固めの有無に関わらず式(5)が適している。

$$Y = \frac{X}{A + B X} \quad (5)$$

一方、安定材としてセメントを用いたものでは、製紙焼却灰のA1成分との硬化反応により長期にわたる強度の増加がみられるため、供試体成形時に締固めたものは回帰式(2)が、また、締め固めないものは回帰式(4)が最もよく適合する。

$$Y = A + B \cdot \log X \quad (2)$$

$$Y = A X^B \quad (4)$$

## 参 考 文 献

- 1) たとえば桑原啓至、松本豊、下野健一、山本登久男：製紙スラッジ焼却灰のアスファルト舗装材料への利用、静岡県製紙工業試験場報告、Vol. 30, pp. 98～106, 1978.
- 2) 静岡県紙業協会：P S , P S 灰再利用研究文献抄録書、pp. 2～8, 1988.
- 3) 下野健一、桑原啓至：P S 灰の建材ボードへの利用、P S , P S 灰再利用研究文献抄録書、静岡県紙業協会、pp. 78～92, 1981.
- 4) 嘉門雅史、澤孝平、友久誠司：製紙焼却灰のセメント系固化による有効利用、第24回土質工学研究発表会概要集、pp. 1939～1940, 1989.
- 5) 前出 3)、p. 78.



表 - 4.4.1 製紙焼却灰の化学成分<sup>3)</sup> (%)

分析項目	実験試料	洋紙系	古紙系	クラフト系
SiO <sub>2</sub>	43.6	57.1	51.9	24.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.3	31.4	30.3	54.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.0	1.2	1.0	2.1
CaO	12.7	2.3	4.0	10.8
MgO	11.0	8.1	11.8	0.6

表 - 4.4.2 製紙焼却灰の物理的性質

比 重	2.47
ブ レ ー ン 値 ( c m <sup>2</sup> / g )	700
強 熱 減 量 ( % )	1.6
液 性 限 界 ( % )	70.8
塑 性 限 界 ( % )	N. P.
砂 分 ( 75 μ m 以 上 ) ( % )	49.5
シ ル ト 分 ( 5 ~ 75 μ m ) ( % )	44.6
粘 土 分 ( 5 μ m 以 下 ) ( % )	5.9
D <sub>60</sub> ( m m )	0.097
D <sub>30</sub> ( m m )	0.036
D <sub>10</sub> ( m m )	0.012
均 等 係 数 U <sub>c</sub>	8.1
曲 率 係 数 U <sub>c'</sub>	1.1

表 - 4.4.3 安定材の配合と供試体の成形時含水比

安定材の種類	安 定 材 の 配 合 (%)				安定材添加量 (%)	成形時含水比 (%)
	セメント	消石灰	硫酸アルミニウム	炭酸ナトリウム		
セメント	100	—	—	—	5, 10, 20, 30	40, 60, 80 (最適含水比)
CAS材	75	10	9	6		

表－4.4.4 製紙焼却灰のC B R試験結果

安定材添加率（％）		1	3	5	10	20
安定材	含水比（％）					
C A S 材	40	67.9	84.7	135	285	注1)
	60	4.9	8.7	11.4	30.5	90.6
セメント	40	43.8	71.4	80.8	147	292
	60	5.3	4.8	5.3	18.2	54.7

注1) 貫入量0.6mmで5 tに達する。

表－4.4.5 製紙焼却灰の溶出試験結果（mg/l）

溶出元素	C a	A l	S i	S
加水直後	20	8.9	2.3	11
加水7日後	19	16	1.6	8.4

表-4.4.6 固化処理した製紙焼却灰の配合と適合回帰式 (回帰式(5))

安定材	安定材 添加率 (%)	成形時含水比 (%)	適合回帰式番号 (相関係数0.9以上)	相 関 係 数					回 帰 係 数 (式(5))		91日養生後の強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )		終局強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	
				式 (1)	式 (2)	式 (3)	式 (4)	式 (5)	A 値	B 値	実験値	回帰推定値		1 / B
C A S 材	5	4.0	1, 5, 3, 4, 2	0.997	0.943	0.981	0.975	0.986	0.489	0.112	8.0	8.5	8.9	
		6.0	1, 5, 4, 3, 2	0.996	0.947	0.978	0.979	0.986	0.627	0.150	6.5	6.4	6.7	
		8.0	1, 5, 4, 3, 2	0.996	0.950	0.976	0.981	0.987	1.555	0.384	2.4	2.5	2.6	
	10	4.0	5, 4	0.765	0.871	0.733	0.910	0.965	0.262	0.042	23.5	22.5	24.1	
		6.0	5, 2	0.735	0.940	0.588	0.870	0.991	0.386	0.055	17.1	17.0	18.3	
	20	8.0	5	0.616	0.890	0.561	0.872	0.948	1.488	0.113	7.5	7.7	8.8	
		4.0	5	0.715	0.876	0.669	0.880	0.952	0.077	0.024	42.7	47.9	41.9	
	30	6.0	2, 5	0.838	0.976	0.576	0.882	0.957	0.214	0.014	52.7	52.0	72.6	
		8.0	2, 5	0.834	0.990	0.616	0.886	0.951	0.444	0.022	36.3	36.8	44.8	
	セメント	5	4.0	5	0.608	0.777	0.583	0.809	0.968	0.067	0.020	51.2	48.8	50.6
6.0			5, 2	0.737	0.959	0.566	0.890	0.988	0.011	0.088	84.1	83.5	90.9	
10		8.0	5, 2, 4	0.804	0.980	0.670	0.934	0.993	0.147	0.019	49.0	49.1	53.3	
		締固め有り	5, 2, 4, 1, 3	0.799	0.911	0.709	0.897	0.974	—	—	—	—	—	
20		締固め無し	5, 2, 4, 1, 3	0.818	0.953	0.706	0.918	0.970	—	—	—	—	—	
		4.0	4, 5, 2, 1, 3	0.967	0.988	0.907	0.999	0.995	0.593	0.156	6.1	6.1	6.4	
30		6.0	2, 5, 4, 1, 3	0.892	0.996	0.716	0.926	0.982	2.193	0.280	3.3	3.3	3.6	
		8.0	5, 4, 2, 1, 3	0.964	0.970	0.911	0.962	0.990	3.712	0.644	1.3	1.5	1.6	
セメント		10	4.0	2, 5, 4	0.865	0.981	0.614	0.927	0.942	0.593	0.040	28.0	27.9	35.1
			6.0	2, 4, 5	0.875	0.969	0.737	0.953	0.937	0.903	0.031	24.5	24.7	32.7
	20	8.0	2, 4, 5	0.825	0.963	0.748	0.943	0.930	2.514	0.073	9.7	10.0	13.7	
		4.0	2, 5, 4	0.854	0.972	0.633	0.910	0.941	0.196	0.009	91.9	92.6	115.6	
	30	6.0	2, 4, 1	0.924	0.976	0.728	0.959	0.859	0.450	0.008	72.7	75.1	119.5	
		8.0	4, 1, 5, 2	0.986	0.947	0.889	0.993	0.991	0.840	0.008	57.9	58.0	117.8	
	相関係数の 平均値	4.0	5, 2, 4	0.886	0.971	0.671	0.911	0.974	0.078	0.005	154.7	150.7	186.4	
		6.0	5, 2, 4	0.880	0.980	0.806	0.959	0.988	0.112	0.006	129.7	129.2	155.3	
	相関係数の 平均値	8.0	1, 2, 4	0.983	0.972	0.838	0.972	0.845	0.450	0.005	103.3	105.1	211.9	
		締固め有り	2, 5, 4, 1, 3	0.893	0.979	0.727	0.943	0.952	—	—	—	—	—	
相関係数の 平均値	締固め無し	4, 2, 1, 5, 3	0.940	0.963	0.842	0.973	0.929	—	—	—	—	—		
	4.0	5, 2, 4	0.886	0.971	0.671	0.911	0.974	0.078	0.005	154.7	150.7	186.4		
相関係数の 平均値	6.0	5, 2, 4	0.880	0.980	0.806	0.959	0.988	0.112	0.006	129.7	129.2	155.3		
	8.0	1, 2, 4	0.983	0.972	0.838	0.972	0.845	0.450	0.005	103.3	105.1	211.9		

注) 回帰式番号

- (1)  $Y = A + BX$
- (2)  $Y = A + B \cdot \log X$
- (3)  $Y = A \cdot 10^{BX}$
- (4)  $Y = A X^B$
- (5)  $Y = \frac{X}{A + BX}$

表-4.4.7 固化処理した製紙焼却灰の配合と適合回帰式（回帰式(2)）

安 定 材	安 定 材 添加率（％）	成形時含水比 （％）	回帰係数（(2)式）	
			A 値	B 値
セメント	5	4 0	1.651	2.646
		6 0	0.381	1.671
		8 0	0.248	0.685
	1 0	4 0	1.064	10.962
		6 0	-1.928	13.456
		8 0	-2.323	6.511
	2 0	4 0	-1.187	47.004
		6 0	-8.438	39.736
		8 0	-9.780	26.479
	3 0	4 0	8.715	76.886
		6 0	-16.172	75.839
		8 0	-31.851	64.412

(2) 式  $Y = A + B \cdot \log X$

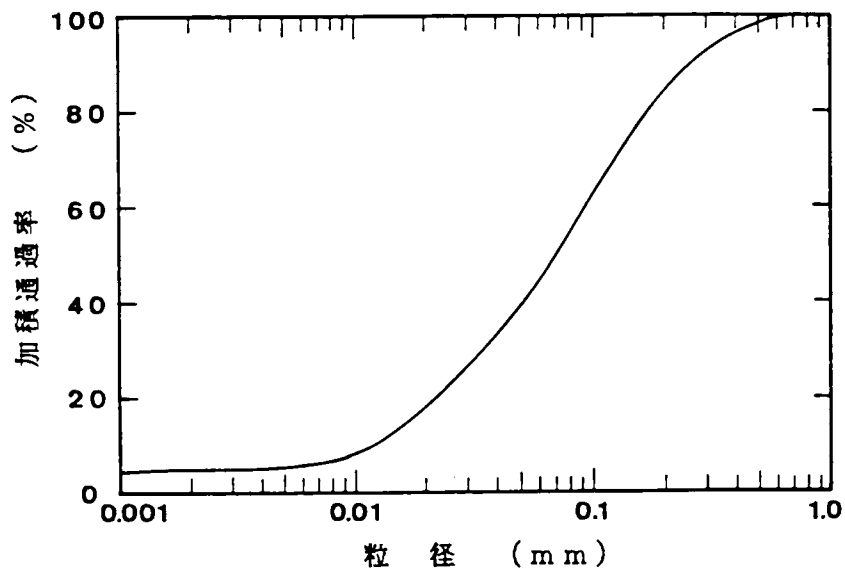


図-4.4.1 焼却灰の粒径加積曲線

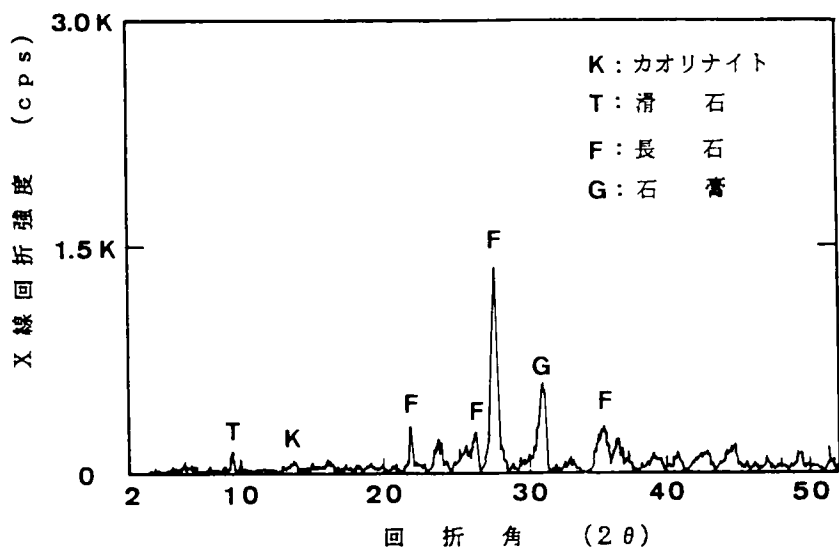


図-4.4.2 焼却灰のX線回折結果

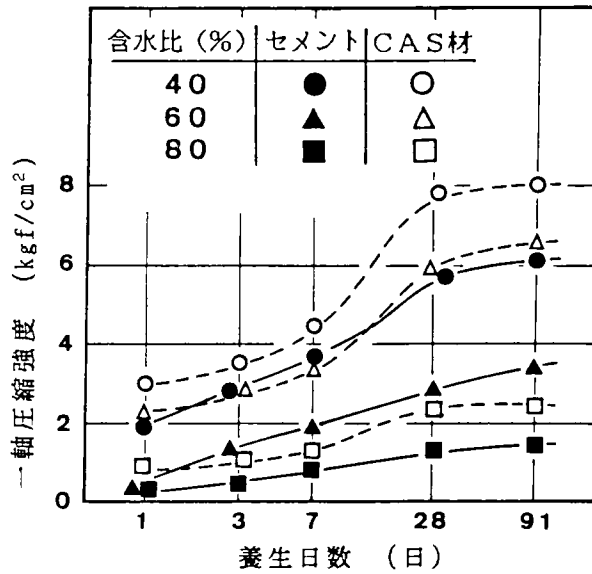


図-4.4.3 養生日数と強度の関係 (安定材添加率5%)

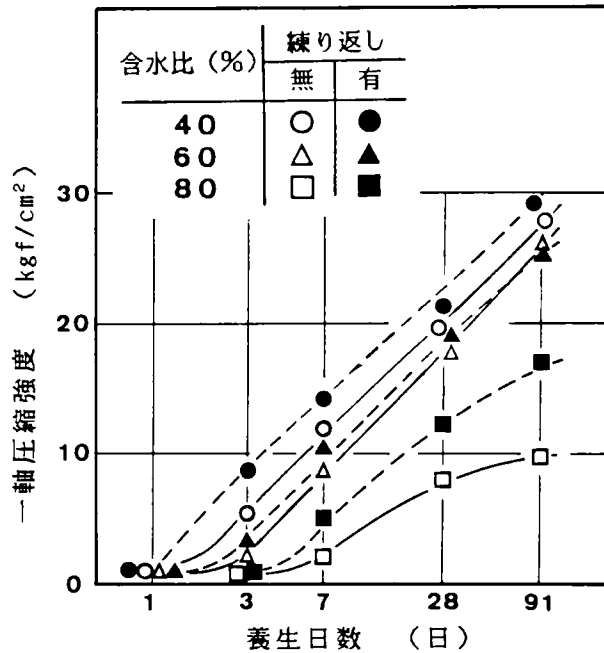


図-4.4.4 養生日数と強度の関係 (セメント添加率10%)

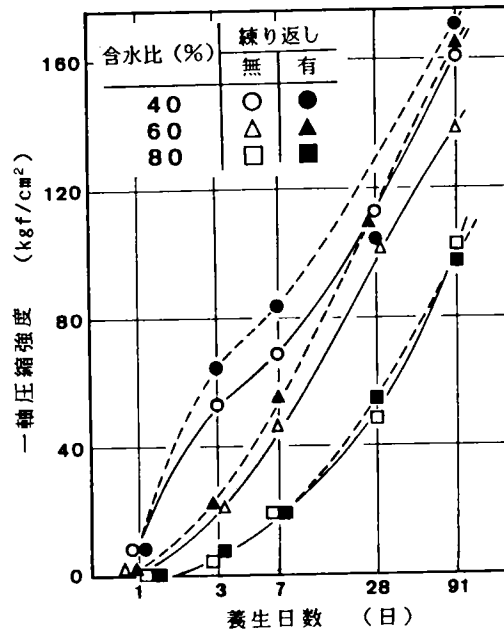


図-4.4.5 養生日数と強度の関係（セメント添加率30%）

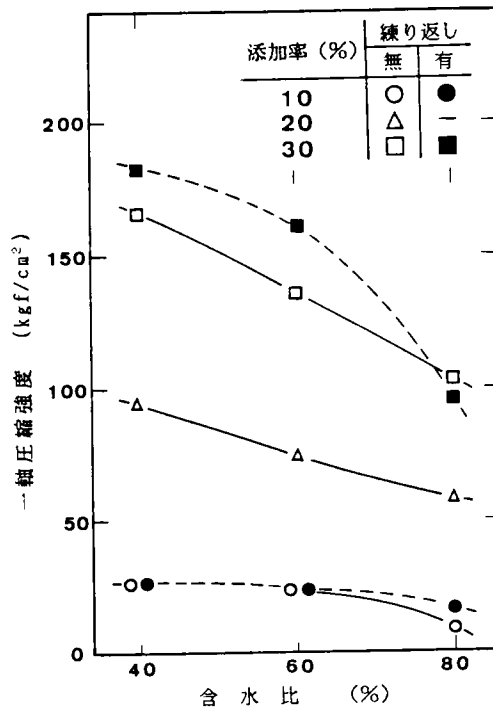


図-4.4.6 成形時含水比と強度の関係（セメント、91日養生）

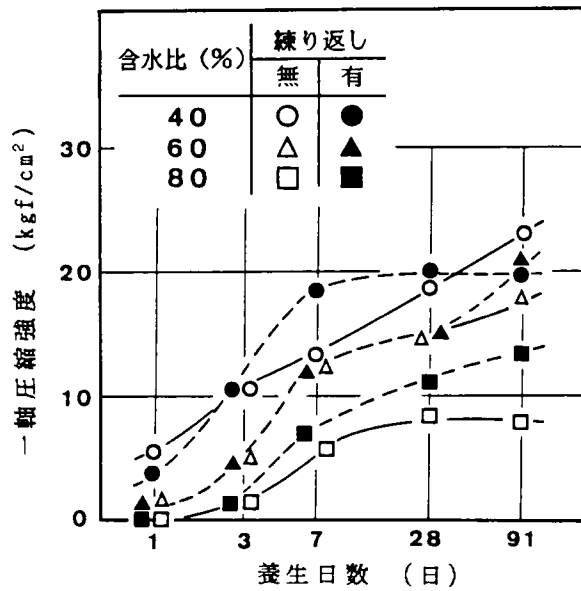


図-4.4.7 養生日数と強度の関係 (C A S 材添加率10%)

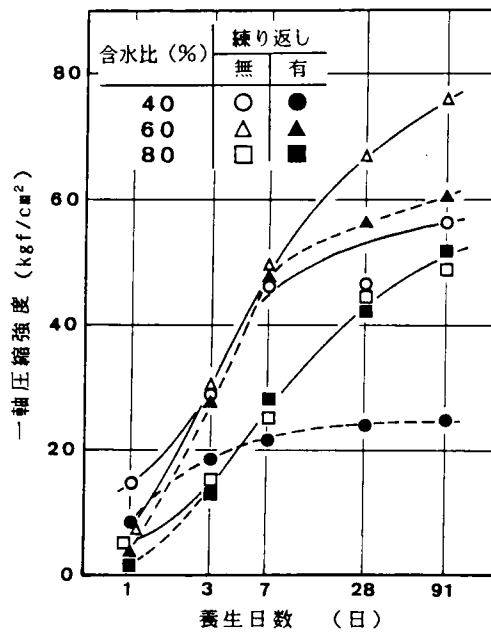


図-4.4.8 養生日数と強度の関係 (C A S 材添加率30%)



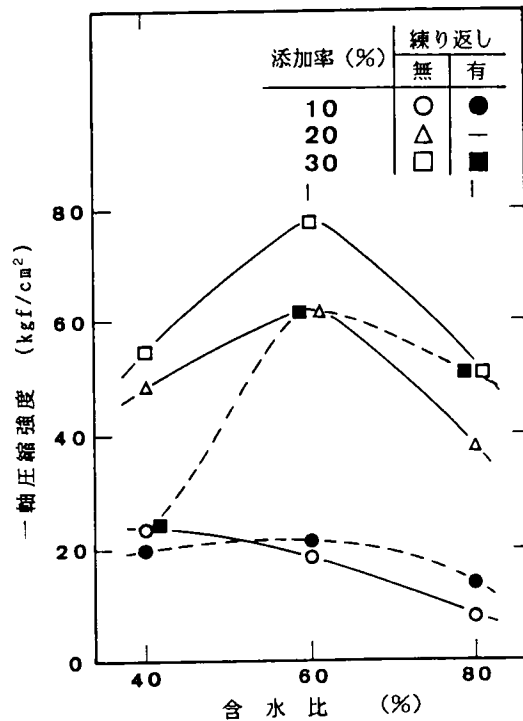


図-4.4.9 成形時含水比と強度の関係 (CAS材、91日養生)

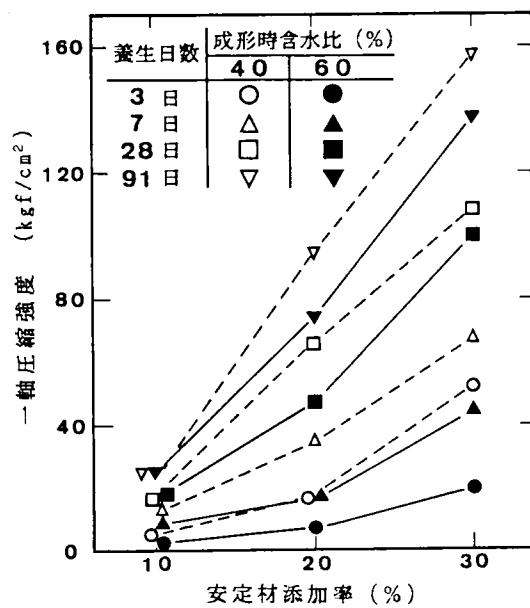


図-4.4.10 安定材添加率と強度の関係 (セメント)

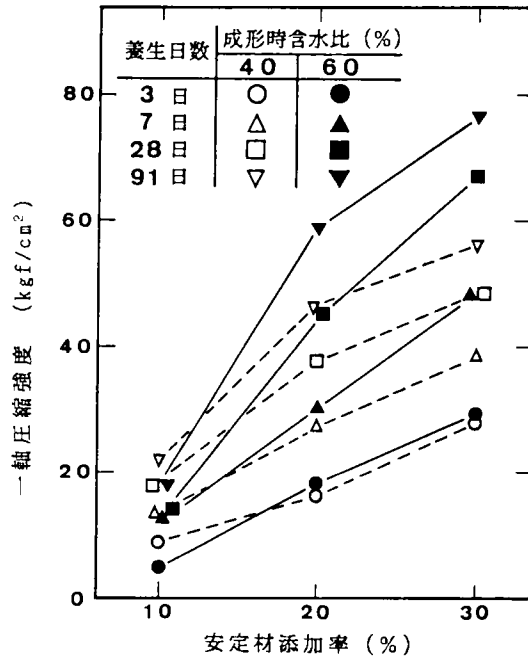


図-4.4.11 安定材添加率と強度の関係 (C A S 材)

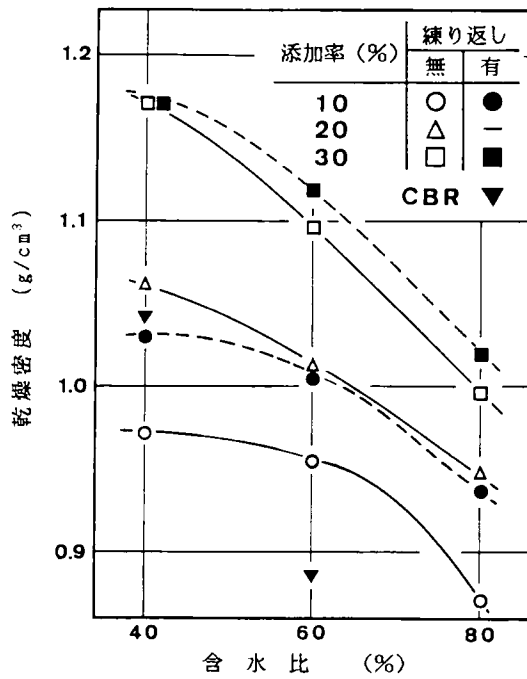


図-4.4.12 成形時含水比と乾燥密度の関係 (セメント、91日養生)

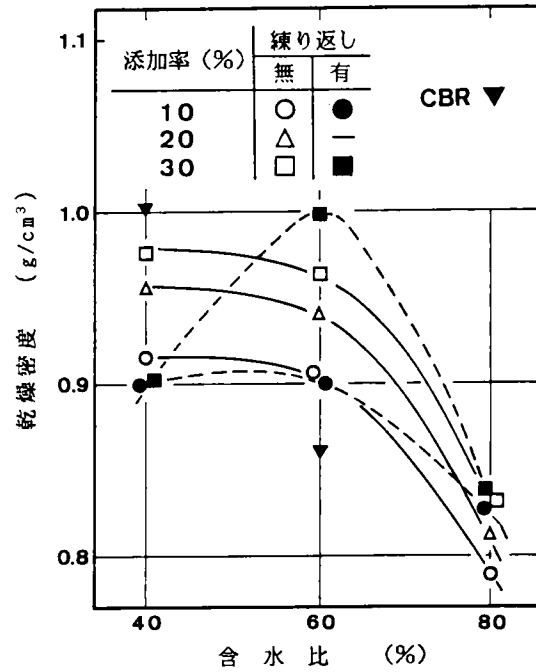


図-4.4.13 成形時含水比と乾燥密度の関係（CAS材、91日養生）

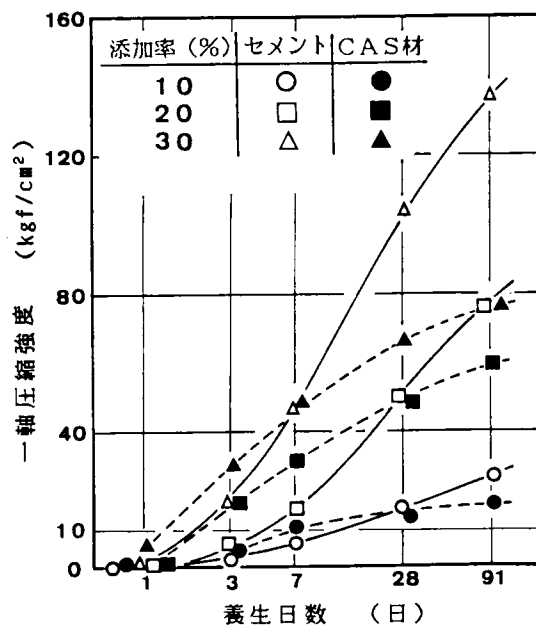


図-4.4.14 養生日数と強度の関係（含水比60%）

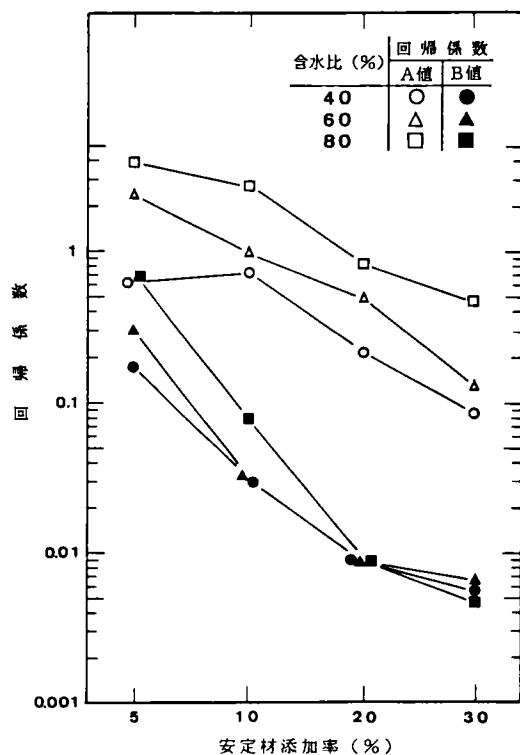


図-4.4.15 安定材添加率と回帰係数の関係 (セメント、回帰式(5))

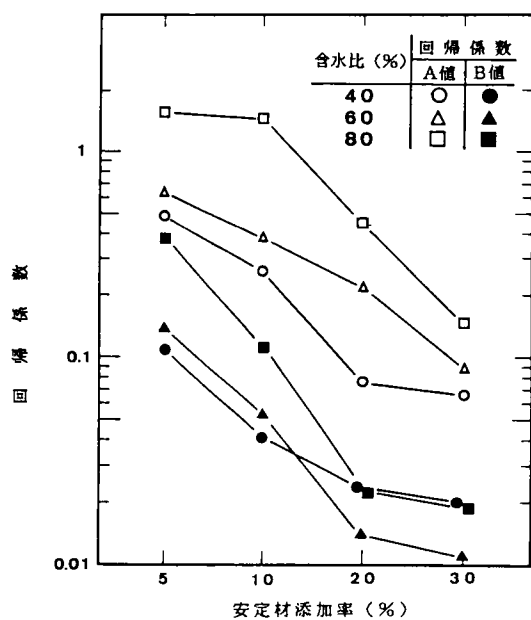


図-4.4.16 安定材添加率と回帰係数の関係 (C A S 材、回帰式(5))

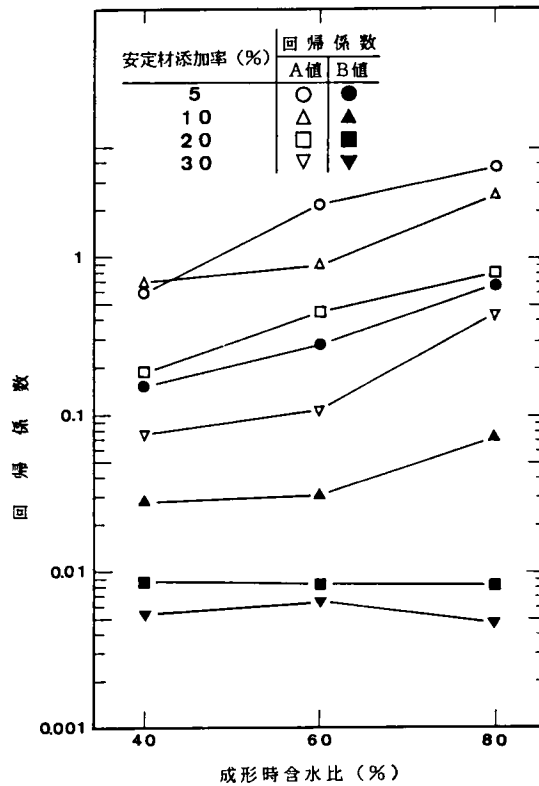


図-4.4.17 成形時含水比と回帰係数の関係（セメント、回帰式(5)）

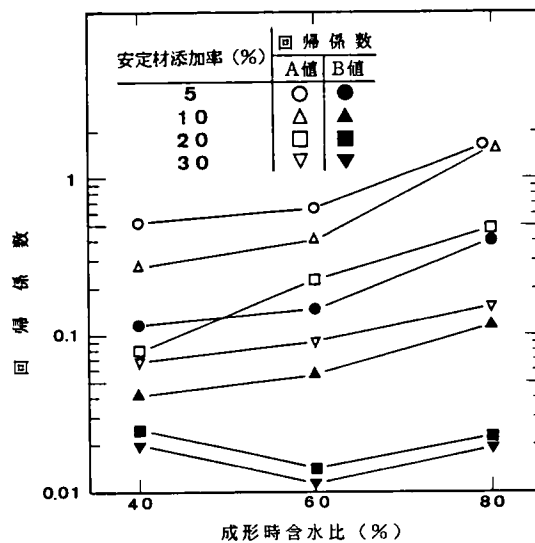


図-4.4.18 成形時含水比と回帰係数の関係（C A S 材、回帰式(5)）

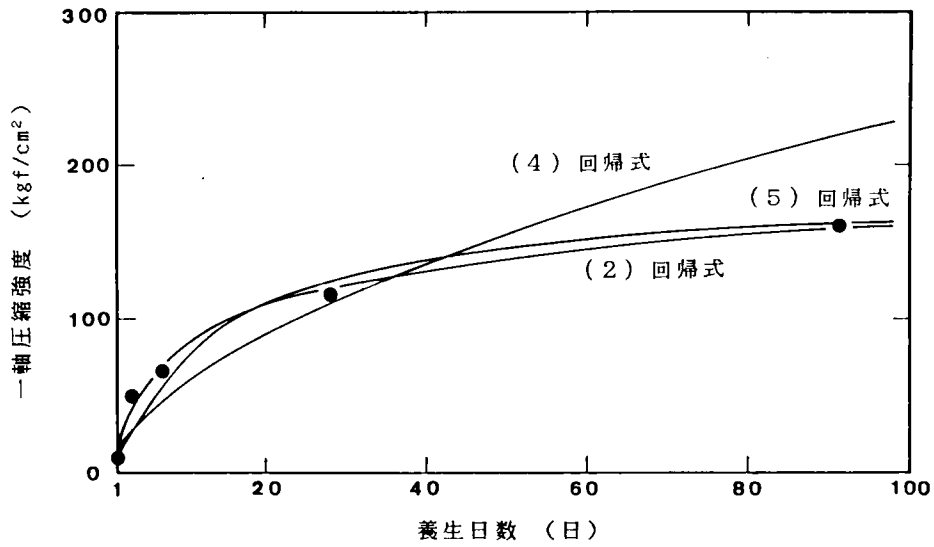


図-4.4.19 強度試験の結果と回帰式の比較  
(セメント添加率30%、含水比40%)

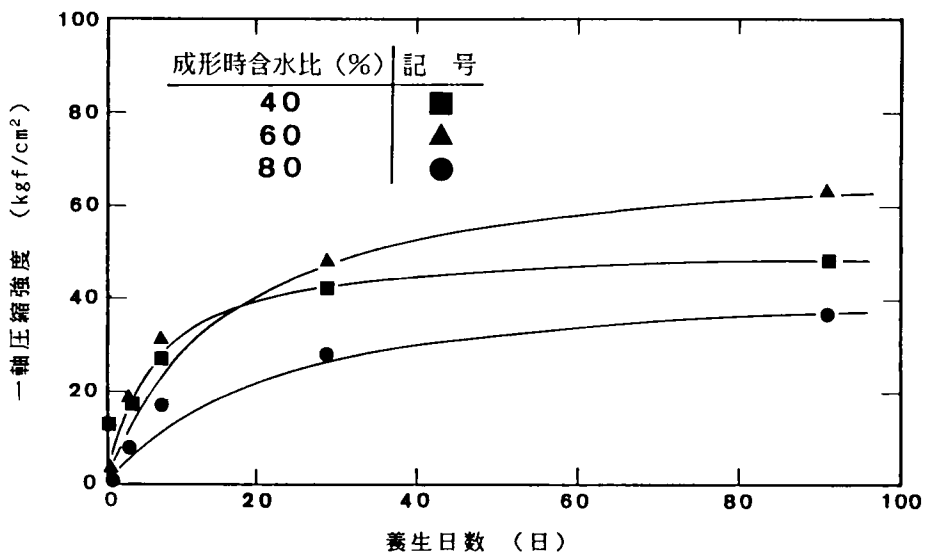


図-4.4.20 養生日数と強度の関係 (C A S 材添加率20%)

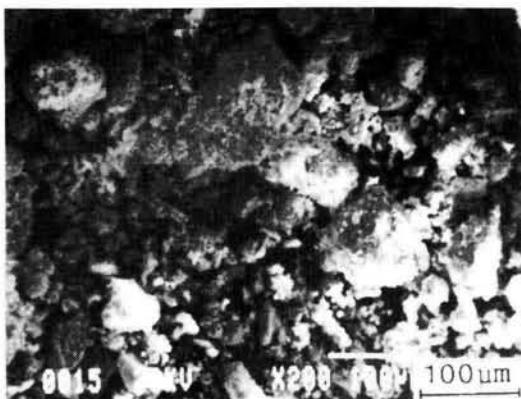


写真-4.4.1 製紙焼却灰のSEM像

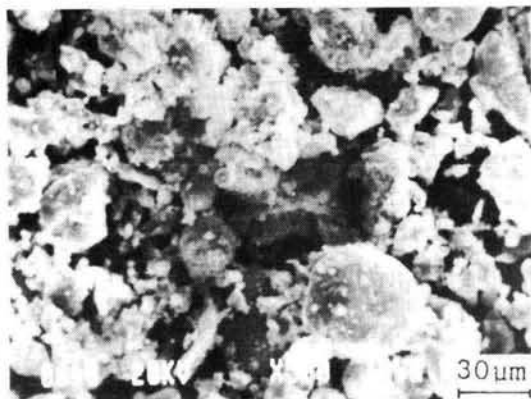
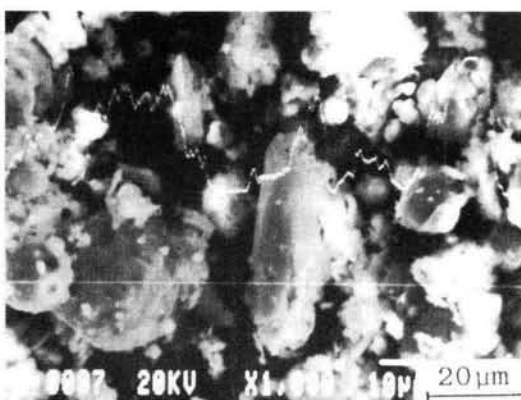
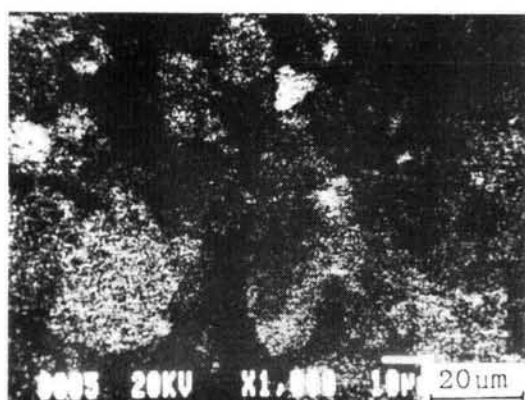


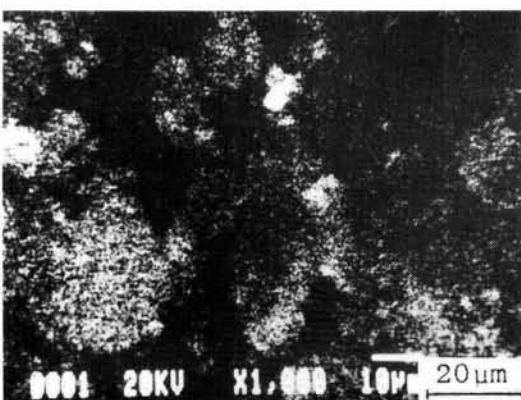
写真-4.4.2 製紙焼却灰のSEM像



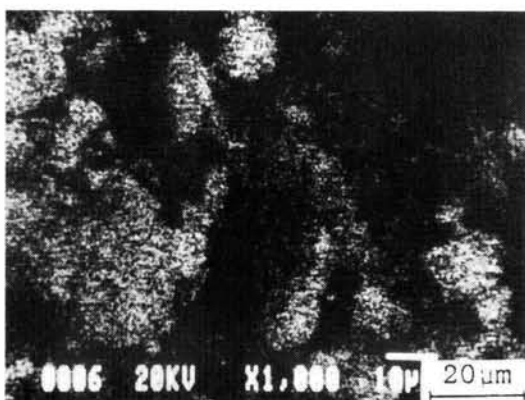
(a) SEM像



(b) 面分析結果 (S i)



(c) 面分析結果 (C a)



(d) 面分析結果 (A l)

写真-4.4.3 製紙焼却灰のSEM-EDXA分析結果

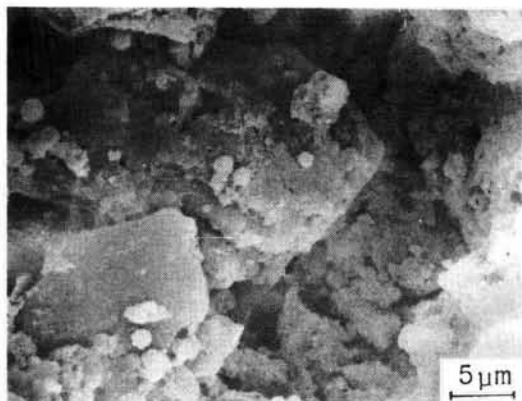


写真-4.4.4 セメント処理灰のSEM像  
(添加率10%、含水比40%、7日養生)

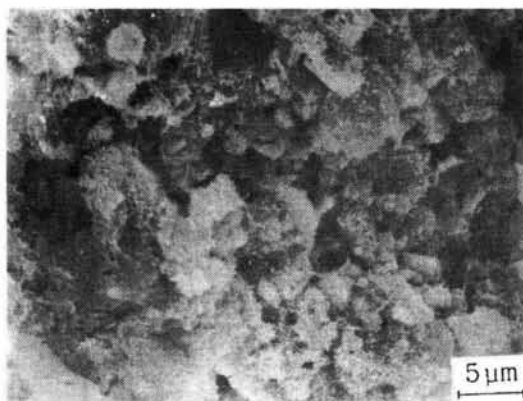


写真-4.4.5 セメント処理灰のSEM像  
(添加率10%、含水比40%、91日養生)

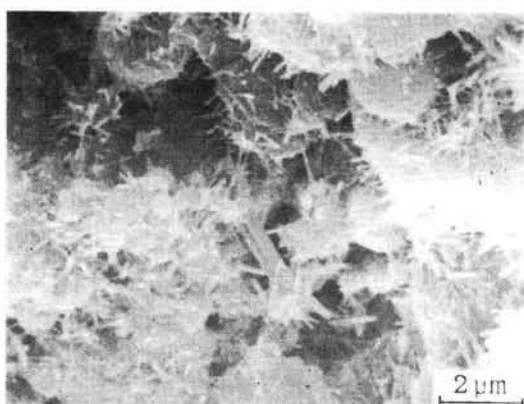


写真-4.4.6 セメント処理灰のSEM像  
(添加率10%、含水比80%、7日養生)



写真-4.4.7 セメント処理灰のSEM像  
(添加率30%、含水比40%、7日養生)

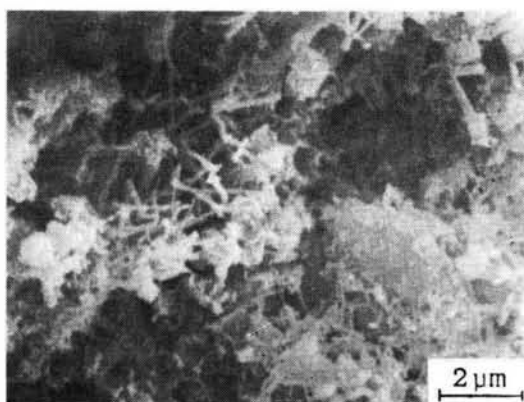


写真-4.4.8 セメント処理灰のSEM像  
(添加率30%、含水比40%、7日養生)



写真-4.4.9 セメント処理灰のSEM像  
(添加率30%、含水比80%、91日養生)



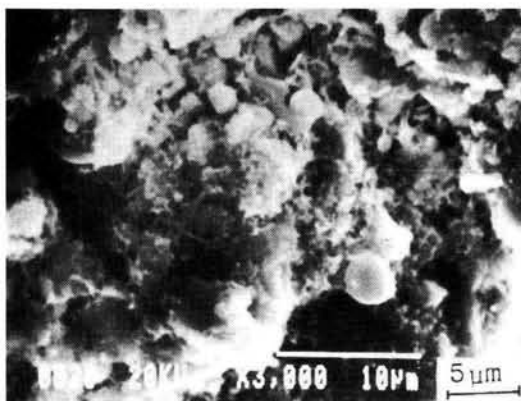


写真-4.4.10 CAS材処理灰のSEM像  
(添加率10%、含水比60%、28日養生)

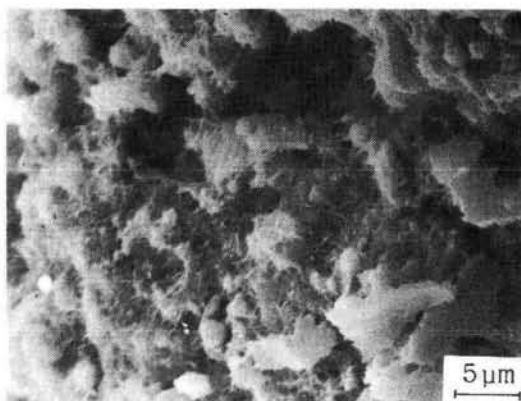


写真-4.4.11 CAS材処理灰のSEM像  
(添加率10%、含水比80%、7日養生)

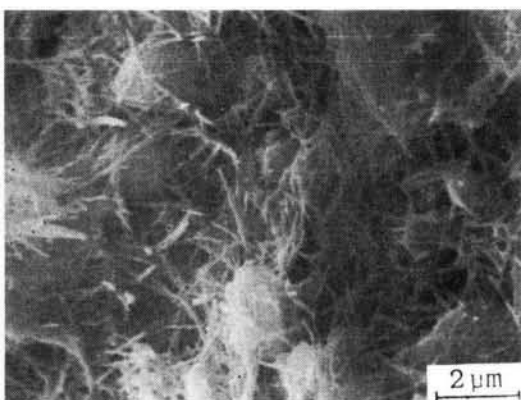


写真-4.4.12 CAS材処理灰のSEM像  
(添加率10%、含水比80%、7日養生)

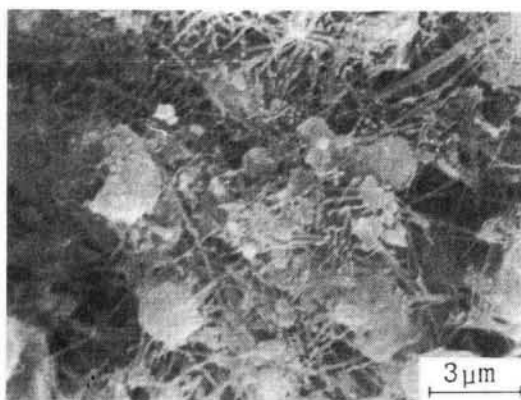


写真-4.4.13 CAS材処理灰のSEM像  
(添加率30%、含水比40%、7日養生)

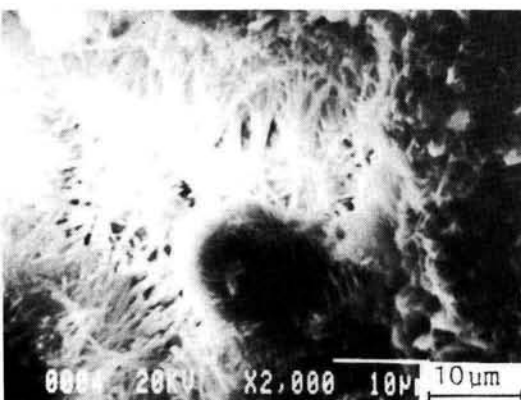


写真-4.4.14 CAS材処理灰のSEM像  
(添加率30%、含水比40%、28日養生)

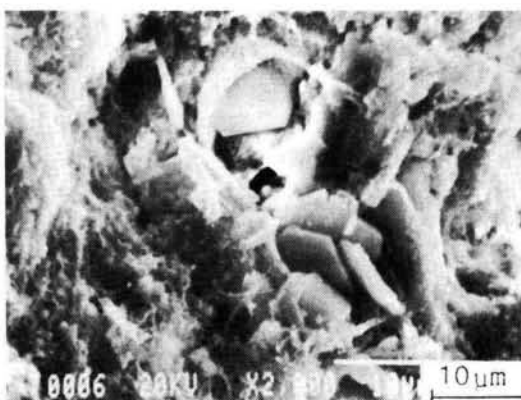


写真-4.4.15 CAS材処理灰のSEM像  
(添加率30%、含水比60%、28日養生)

#### 4. 5 本章のまとめ

産業廃棄物として水硬性粒度調整スラグ、水砕スラグ、フライアッシュ、コンクリート微粉末、製紙焼却灰などを用いて、石灰・セメント系安定材の添加により固化処理し、その強度特性を追究して有効利用の可能性を明らかにした。これらの廃棄物は粒径や物理的性質などは異なるが硬化活性の高い反応性元素を含有するなど硬化反応の促進にそれぞれの特徴を持っているものである。得られた結果をまとめると次のとおりである。

第1節では水硬性粒度調整スラグ（HMS-25）の道路用材料としての品質特性と強度特性について検討した。また、養生初期の強度促進と高強度材料としての利用を目的として安定材の添加および養生方法の違いによる処理した水硬性粒度調整スラグの強度発現について検討した。

HMS-25は原材料、製造施設、製造方法、および粒度調整方法によって物理的性質に違いはあるものの、それぞれの製鉄所毎に品質の変動はほとんどみられない。そして、含有している水砕スラグの水硬性により、養生の経過に伴う長期間にわたる強度増加が期待できる。用いたHMS-25はいずれも2週間養生でJISの基準強度12kgf/cm<sup>2</sup>を達成しているが、強度の変動の大きなものは物理的性質が変化しており、物理的性質を管理することにより強度管理の目安になることがわかった。また、製造時の磁選作業にも関わらずHMS-25中に残留している鉄分は、長期間の養生で酸化し、膨張クラックの原因となるためHMS-25製造時の鉄分の除去が重要である。

HMS-25の潜在水硬性を促進させ長期強度を高めるために最も有効な養生方法は湿潤養生、および気乾と水浸をくり返して行う養生である。HMS-25中の水分はスラグ粒子からのアルカリ分の溶出を促進し、微細な硬化反応物をスラグ粒子表面に形成して供試体の剛性を高める。また、硬化反応生成物によるスラグ粒子の表面積の増大によって吸水率も増加し、微細な反応生成物に吸着された水が、さらに、スラグ粒子表面のSiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>およびCaOの溶出を促進し、水和反応物を析出することにより、一層の強度増加に貢献するものである。そして、HMS-25の強度増加には硬化反応生成物としてエトリンガイトとCaCO<sub>3</sub>の生成が有効であることが確認された。

次に、安定材として水砕スラグを添加し、供試体含水比の高い養生方法を行うと強度は長期にわたり増進する。さらに、石灰の併用により養生初期の強度が著しく大きくなる。

一方、石灰や水砕スラグに石膏を併用すると、硫酸イオンによる固化効果が顕著になり反応性の低い気乾養生においても長期にわたる強度増加がみられる。しかし、反応性の高い供試体中の水分の多い養生を行うと、エトリンガイトの生成による膨張クラックのため供試体は崩壊

し、現場への適用は不可能と判断できる。

HMS-25の硬化反応はスラグ中の細粒子の影響が大きいため、5mm以下の粒子を用いた小供試体を作製し強度試験を行った。その結果、JIS A 5015に定められた試験方法の強度が質量で1/20程度の小供試体により推定できることがわかり、これは試験方法の簡便化に役立つと考えられる。しかしながら、試料毎に強度の発現傾向は異なるため、前もってその強度発現傾向を検討しておく必要がある。

第2節では将来その排出量が増大するとともに、品質の低下が問題とされている石炭灰の一種であるフライアッシュと粉状の高炉水砕スラグを使用し、石灰・セメント系安定材を用いて固化し、有効利用の可能性について検討した。

スラグについては、既に各種の研究ならびに利用実績があり、有効利用の技術はほぼ軌道に乗っていると言えるが、フライアッシュについてはあまり実績がなく、特に、今回用いたフライアッシュのような良質でないものについては、ほとんど利用されていないというのが現状である。

スラグはCAS材を添加すると、その添加率に応じてコンクリート並の高強度の得られることが明らかになり、その硬化活性の良さが確認できた。

一方、フライアッシュに安定材としてCAS材を12%まで添加した処理灰では、国内炭フライアッシュは養生に伴う強度の増加がみられたのに比べ、国外炭フライアッシュは強度の増加がみられず、フライアッシュの種類による硬化活性の違いがみられた。また、安定材を30~40%に増加すると、締固めたものはもちろん締固めを行わない密度の低い状態のフライアッシュ処理灰の強度発現も顕著となり、利用形態として高含水比(60~65%)でのフライアッシュを注入材や充填材として用いることが可能となった。

硬化反応生成物はフライアッシュの化学成分や、その溶出性により異なり、S成分が多い国内炭フライアッシュを用いた処理灰はエトリンガイトの生成が顕著であり、高い強度発現に貢献している。一方、国外炭フライアッシュはS成分が少なく、Al成分が多いためCAH系反応生成物やモノサルフェートの板状結晶が多く、強度はあまり高くない。また、供試体中の水分量の多い養生では高硫酸塩型のエトリンガイトの生成や、その成長が盛んであるが、水分量の少ない場合は低硫酸塩型のモノサルフェート水和物が生成しやすくなる。

石灰・セメント系安定材を添加した処理灰の強度発現はフライアッシュの種類により違いがみられるが、さらに安定材の硬化反応性と処理灰の締固めの程度が回帰式の決定に関係深いことがわかった。

締固めた処理灰は粒子間隙が小さく、養生初期に生成される硬化反応物で大きな強度になり、その後の強度増加は養生初期に比べると小さいため次の回帰式(5)の適合性がよいことがわか

った。

$$Y = \frac{X}{A + B X} \quad (5)$$

一方、成形時含水比の大きな締固めていない処理灰は養生初期の少量の反応生成物での強度発現は小さく、長期にわたる硬化反応物の生成で徐々に強度の増加がみられるため次の回帰式(4)が適合していることがわかった。

$$Y = A X^B \quad (4)$$

次に、安定材の強度特性から定式化を考えてみると、安定材の添加率が40%と多量の場合、セメントは養生初期の強度発現が顕著であり、式(5)の適合性がよい。一方、C A S材はエトリンガイトが数100kgf/cm<sup>2</sup>の高強度に貢献できないためか、セメントだけの添加に比べ、養生初期の強度の発現は小さくなっている。そして、処理土を締固めた場合は式(5)が、また、締固めない場合は式(4)や式(1)が適していることがわかった。また、安定材としてセメントを単独に用いたものでは処理土の締固めの程度やフライアッシュの反応性の違いにより養生初期の強度発現に違いを生じているが、長期養生の終局強度は締固めたものは約450kgf/cm<sup>2</sup>、締固めないものでは約270kgf/cm<sup>2</sup>になり、フライアッシュの種類に関係なく締固めの程度だけが影響していることがわかった。そして、締固めを行わない処理灰の強度は締固めを行ったものの強度に比べ強度低下が大きく、処理灰施工時の締固めが大変重要であることがわかった。一方、C A S材を添加したものでは安定材添加量が増加し、締固めを行うことにより高強度になり、また、フライアッシュの硬化活性に応じた強度発現を示している。そして、硬化活性の高いフライアッシュに安定材を加え、締固めると、式(5)の回帰係数B値は安定材添加率が30から50%に関わらず、ほぼ同じ値になり、少ない安定材添加量でも高い固化効果の得られることが明らかになった。また、安定材を30～50%添加した処理灰は、3日で50kgf/cm<sup>2</sup>以上の一軸圧縮強度となり、高強度材料としての利用が可能となった。

第3節ではコンクリート微粉末の処理について、安定材として普通ポルトランドセメントとC A S材とを用いて、その固化特性を調べた。そして、より高度な利用方法としてセメントと混合し、それを安定材とする高度有効利用の可能性を検討した。

コンクリート微粉末は既に水和反応が終了した材料であり、ポゾラン反応などの硬化活性において、あまり有効な材料ではない。しかし、セメントなどの自硬性の安定材を添加することにより強度は増加し、有効利用が可能となった。

強度増加に貢献する反応生成物は、養生初期ではセメントの水和によるC S H系反応生成物や、エトリンガイトおよび圧縮試験時に強度低下の要因となるCa(OH)<sub>2</sub>を炭酸化したCaCO<sub>3</sub>である。また、長期にわたる強度増加はCaCO<sub>3</sub>やC S H系反応生成物、およびポゾラン反応による

ものと考えられる。特に、処理した試料の骨格構造を形成し、剛性を高めるのはC S H系反応生成物と考えられる。

コンクリート微粉末に対し、安定材としてのセメントの一部をC A S材で置き換えることにより、セメント単独の添加に比べ顕著な強度増加がみられ、その最適添加量は安定材中の5%である。そして、特に、安定材添加率の小さい場合と、養生初期の強度発現の大きいことがわかった。安定材としてセメントだけのC CとC A S材を5%添加したC B Cを比較すると、高い長期強度を得るためには6%までの低添加率ではC B Cが、9%以上の高添加率ではC Cが有効である。そして、安定材の添加効率から安定材の最適添加量は9%程度であることがわかった。一方、コンクリート微粉末を高強度材料として利用するための安定材としてはC A S材を10%添加し、セメントを併用したものが養生初期から長期にかけて大きな強度を示すが、セメントの最適添加量は30%である。

そして、コンクリート微粉末にセメントとC A S材を95:5で混合したC B Cを6%程度から10数%添加することにより、下層および上層路盤として利用することが可能となった。また、コンクリート微粉末に40~50%のセメントと0~10%のC A S材を添加することにより、3日養生で100~200kgf/cm<sup>2</sup>の強度が得られ、コンクリート2次製品のような高強度材料としての利用が可能となった。さらに、セメントとコンクリート微粉末を1:1の割合で混合したものを安定材とし、C B Rが約5のローム土に25%程度添加することにより、C B R30以上の良好な土質安定処理効果の得られることが明らかになり、コンクリート微粉末の高度利用が可能となった。

次に、処理したコンクリート微粉末の強度発現を回帰式で表すと、低強度材料に使用することを目標とした安定材添加量の少ない場合(12%以下)、セメントだけでは養生に伴う強度の発現が急激でなく、長期にわたる強度の増加がみられるため式(4)が適合している。一方、C A S材を添加したC B Cと安定材を多量添加したコンクリート微粉末では、養生初期の強度増加が顕著になり、式(5)の相関係数が高くなっており、長期養生に伴う強度の増加の少ないことがわかった。そして、コンクリート微粉末が硬化反応性の低い材料であることが確認できた。また、高強度材料を目標とした安定材を30~50%添加したコンクリート微粉末の強度発現は養生初期の強度増加が顕著であり、回帰式(5)の適合性がよい。

第4節では製紙焼却灰を普通ポルトランドセメントとC A S材を用いて安定処理を行い、建設材料などへの有効利用を目的として固化特性を追究した。

安定材の固化特性として、セメントは水和反応、および水和反応により生成された石灰と焼却灰との反応により長期にわたる強度の増加がみられ、大きな強度が得られる。一方、C A S材は養生初期の強度発現が顕著であり、特に、添加率の小さい処理灰ではセメントに比べ、養

生初期から長期に至るまで大きな強度になる。そして、安定材添加率5～30%、成形時含水比40～80%の範囲において、セメント処理灰はセメント量の増加、および成形時含水比の減少により乾燥密度が増加し、大きな固化効果が得られる。しかし、C A S材を添加した処理灰では、添加量の増加により高強度が得られるが、添加量の多い場合での成形時含水比の減少はエトリンサイトなどの硬化反応のために必要な水分が不足し、強度の減少がみられ、C A S材添加量に応じた最適な成形時含水比の存在することがわかった。

硬化反応生成物は養生初期ではC S H系反応生成物とエトリンサイトが主なものであり、長期養生ではC S HやC A H系反応生成物、およびモノサルフェートなどがみられ、長期強度の増加に貢献していることが明らかになった。そして、製紙焼却灰は溶出性の良い硬化反応性元素を含有し、耐久性の検討が必要であるが、C A S材を10%、あるいはセメントを14%程度添加することにより下層路盤として使用でき、道路材料や建設材料などとしての有効利用が可能となった。

また、処理灰の加水混合2時間後の練り返しによる影響は処理灰中に締固めや硬化反応に必要な水分量があれば2時間までは影響のないことがわかった。しかし、処理灰中の水分が不足する場合は練り返し後の締固めにより乾燥密度が低下し、硬化反応も進まないため長期にわたる強度増加は得られない。

次に、処理灰の強度発現を回帰式で表わすと、製紙焼却灰の安定処理において、安定材としてC A S材を用いた処理灰の養生に伴う強度発現は、回帰式(5)の適用性がよい。

一方、安定材としてセメントを用いたものでは養生初期の強度発現が小さく、長期にわたる強度の増加がみられるため、供試体成形時に締固めたものは回帰式(2)が、また、締め固めないものは回帰式(4)が最もよく適合することが明らかになった。

$$Y = A + B \cdot \log X \quad (2)$$

## 第5章 結 論

本論文は、取扱いや処理・処分が困難な問題になっている自然の特殊土、および産業廃棄物に対し、炭酸アルミネート系塩材料（CAS材）などを混合した石灰・セメント系安定材を添加して固化し、盛土や道路などの建設材料として有効利用を図ることを目的としている。また、産業廃棄物に付加価値を与え、より高度な利用を目的として処理対象土ではなく安定材としての適用性についても検討を行った。

研究の対象とした試料は自然の発生試料として、まさ土、へどろ、沖積粘土、降下火山灰であり、また、産業廃棄物としては水硬性粒度調整スラグ、水砕スラグ、フライアッシュ、コンクリート微粉末、製紙焼却灰などであり、それらの物理・化学的材料特性を明らかにし、その有効利用の可能性について強度特性と、微視的な面から硬化反応のメカニズムを追究した。さらに、安定処理土の長期強度の推定と品質管理に役立てるため、強度発現の定式化について検討を行った。

以下に本研究より得られた結果を総括して本論文の結論とするとともに、今後の問題点と将来への展望についてもふれることにする。

第1章では軟弱土および産業廃棄物についての現状と問題点について述べ、これらを安定処理し、建設材料などに有効利用する本研究の意義を明らかにした。

第2章では各種の軟弱土や産業廃棄物を用いた土質安定処理の研究において共通して実施する実験方法と使用する安定材について述べ、処理土の材料特性、強度増加を微視的な見地から追究するX線回折装置、X線マイクロアナライザー、示差熱分析装置、電子顕微鏡、および原子吸光光度計などの分析機器の特徴と使用目的について述べた。

また、安定処理土の改良目標を示し、処理土の養生の経過に伴う強度発現を定式化するため、次の5つの回帰式を提案した。

$$Y = A + B X \quad (1)$$

$$Y = A + B \cdot \log X \quad (2)$$

$$Y = A \cdot 10^{BX} \quad (3)$$

$$Y = A X^B \quad (4)$$

$$Y = \frac{X}{A + B X} \quad (5)$$

ここで、Y : 一軸圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

X : 養生日数 (日)

A、B : 回帰係数

さらに、安定処理土の硬化反応機構を示し、硬化反応生成物の性質と特徴について述べた。

第3章では自然の発生試料として粗粒土で硬化活性の低いまさ土、細粒土で比較的硬化活性の低いへどろと、中程度の沖積粘土、および硬化活性の高い降下火山灰を用いて安定処理を行い、その強度特性を追究し、有効利用の可能性について明らかにした。

第3章1節では水砕スラグを添加したまさ土の石灰安定処理について、水砕スラグの粒径の変化、および養生方法の違いによる強度発現について検討した。

まさ土は中位の風化の程度で粗粒であるため、硬化活性が低く、石灰だけの添加では高い固化効果は得られなかった。そこで、固化効果を高めるため副安定材として水砕スラグを用いた結果、水砕スラグが固化効果を発揮するためには、石灰の存在によるアルカリ刺激が必要であるととともに、水砕スラグから硬化反応性元素を溶出するために処理土中に水分が存在する養生が必要であることがわかった。そして、水砕スラグの細粒化および締固めエネルギーの増加は固化効果を増大し、改良目標強度の到達時間を早め、安定材の節約になることが明らかになった。

水砕スラグを添加したまさ土の石灰安定処理において、強度発現の定式化を考えると水砕スラグの硬化活性と養生条件が問題となる。処理土中に水分が存在する養生を行うと、水砕スラグの硬化反応性イオンの溶出が可能となり、長期養生の強度増加が顕著で回帰式(4)が適合する。また、処理土が乾燥する養生では養生初期の強度発現が大きく、長期養生による強度増加がほとんど見られないため回帰式(5)で強度発現を表わすことができる。

また、硬化反応生成物は養生初期にエトリンガイトやC S H系反応物が生成し、そして、長期養生ではC S H系、およびC A H系反応生成物や炭酸カルシウムの生成により強度の増加することが明らかになった。

第3章2節ではへどろや沖積粘土のような有機物含有量が多く、含水比の高い軟弱粘性土に対して固化処理を行い、道路用材などの建設材料としての有効利用の可能性を検討した。

へどろや沖積粘土の固化において、処理効果は処理対象土の粒度分布や粘土鉱物の種類やその含有量などに大きく影響され、安定材自身の固化とともに、処理土の含水比の減少や塑性の改良によって強度が増加することが明らかになった。

へどろの安定材としてセメント中にC A S材を5%添加したものや、軟弱粘性土用特殊セメントはセメント単独の添加に比べ、養生初期から長期にわたる強度増加が顕著になり、路床および埋立て材料としての利用が可能となった。しかし、へどろ中の有機物を除去すると、セメント単独の添加だけでも大きな固化効果が得られた。



一方、沖積粘土の石灰安定処理では水砕スラグの添加により長期的な強度の増加がみられ、その程度は水砕スラグの細粒化の程度に応じて硬化活性の増加することが明らかになった。そして、乾湿の繰り返しを行った耐久性試験では、高い一軸圧縮強度が得られた安定材の配合で良好な耐久性を示し、処理土の劣化は細粒化と崩壊が同じ傾向で進行することがわかった。

へどろ処理土の強度増加は硬化反応物のエトリンガイトの生成量と線形関係が見られる。しかし、強度増加に最も貢献するものはC S H系反応生成物であり、その剛性の程度によりエトリンガイトの強度への貢献度が異なる。

次に、処理土の強度発現を回帰式で表わすと、石灰・セメント系安定材を用いたへどろは養生初期の強度発現が顕著であり、また、へどろの硬化活性が低く、長期にわたる強度の発現が比較的小さいことより回帰式(5)の適合することがわかった。一方、石灰および水砕スラグを添加した沖積粘土処理土の強度発現は、水砕スラグの粒径の違いによる硬化活性に関わらず、長期にわたる強度発現がみられるため回帰式(4)で表された。

第3章3節では九州桜島の降下火山灰を用いて石灰・セメント系安定材により固化処理し、また、焼結処理を施して建設材料としての有効利用の可能性について検討した。

降下火山灰は活性の高い良好なポズラン材料であり、石灰・セメント系安定材による固化処理により、5%程度の添加で下層路盤に、また、10%程度の添加により上層路盤に使用できることがわかった。

安定材の添加による固化効果は、低添加率(約5%程度)の場合、および養生初期の強度増加ではセメントに比べ、C A S材を混合したセメント系、および石灰系安定材の方が有効である。しかし、高添加率および長期強度の発現はセメント単独の効果の大きいことがわかった。

処理灰の強度発現を回帰式で表わすと、締固めた処理灰では硬化反応物の生成のため養生初期の強度が比較的高く、また、長期にわたる強度増加も若干みられるため式(4)、式(5)の適合性が良い。一方、締固めを行っていない供試体では粒子間隙が大きいため養生初期の強度が低く、長期にわたり強度が発現されるため式(4)、式(2)の適合性がよくなっている。そして、安定材の種類による回帰式の違いはみられなかった。

次に、降下火山灰を安定材で固化処理し、1050℃～1080℃の高温で焼結処理することにより高強度材料としての可能性が明らかになった。そして、固化処理灰の安定材添加量や成形時含水比、および焼結温度の操作により、ポーラスな切削の容易な材料から透水性のない高強度のものまで幅広い品質の材料が得られることがわかり、ブロックなどの土木材料やボード材、タイルなどの建築構造・化粧材料および美術陶芸材料としての利用の可能性が考えられる。

第4章では産業廃棄物として水硬性粒度調整スラグ、水砕スラグ、フライアッシュ、コンクリート微粉末、製紙焼却灰などを用いて、その強度特性を追究し、有効利用の可能性について

明らかにした。

第4章1節では水硬性粒度調整スラグの道路用材料としての品質特性と強度特性について検討した。また、養生初期の強度促進と高強度材料としての利用を目的して安定材の添加および養生方法の違いによる処理したスラグの強度発現について追究した。

水硬性粒度調整スラグはその製造過程より水砕スラグを含有しており、水硬性に基づき養生の経過に伴う長期間にわたる強度の増進が期待できる。そして、スラグの物理的性質を管理することにより強度管理の目安になることがわかった。

水硬性粒度調整スラグの潜在水硬性を促進させ長期強度を高めるために最も有効な養生方法は処理試料中に水分が存在する湿潤養生、および、気乾と水浸を繰り返して行う養生である。そして、処理試料の強度増加には硬化反応生成物としてエトリンガイトと $\text{CaCO}_3$ の生成が有効であることが確認された。

また、安定材として水砕スラグを添加し、供試体中の水分の多い養生を行うと、強度は長期にわたり増進する。さらに、水砕スラグと石灰の併用により、固化効果は顕著となり、特に、養生初期の強度が大きくなる。しかし、石灰と水砕スラグに石膏を併用すると、反応性の低い気乾養生においても長期にわたる強度の増加がみられるが、硬化反応性の高い供試体中の水分の多い養生を行うとエトリンガイトの生成により膨張クラックのため供試体は崩壊し、その実用化は困難となった。

第4章2節では将来その排出量が増大するとともに品質の低下が問題とされている石炭灰の一種であるフライアッシュと粉状の高炉水砕スラグとを使用し、石灰・セメント系安定材を用いて固化し、有効利用の可能性について検討した。

粉状スラグは硬化活性が高く、C A S材を添加すると、その添加率に応じてコンクリート並の高強度の得られることが明らかになった。

一方、フライアッシュは原料炭や焼却方式により、その硬化活性は大きく異なり、粒子表面に付着している遊離石灰と無水石膏の量と、養生方法などにより硬化反応生成物の種類と生成量が決まり、強度が発現される。

石灰・セメント系安定材を添加した処理フライアッシュの強度発現はフライアッシュの種類による違いはあるが、安定材の硬化反応性と処理灰の締固めの程度が回帰式の決定に関係深いことがわかった。

次に、安定材の硬化反応性から定式化を考えると、安定材の添加率が40%と多量の場合、セメントは養生初期の強度発現が顕著であり、締固めの程度に関わらず式(5)の適合性がよい。そして、処理灰の締固めの程度やフライアッシュの反応性の違いにより養生初期の強度発現に違いを生じているが、長期養生の終局強度は締固めたものは約 $450\text{kgf/cm}^2$ 、締固めないもので

は約270kgf/cm<sup>2</sup>になり、フライアッシュの種類に関係なく締固めの程度だけが影響していることがわかった。また、締固めを行わない処理灰の強度は締固めを行ったものの強度に比べ強度の低下が大きく、処理灰施工時の締固めが大変重要であることがわかった。

一方、C A S 材を添加した処理灰はセメントと比較し、養生初期の強度発現は小さくなっている。そして、処理灰を締固めた場合は回帰式(5)が、また、締固めない場合は式(4)や式(1)が適していることが明らかになった。そして、強度の発現は安定材添加量が増加し、締固めを行うことにより顕著になり、フライアッシュの硬化活性に応じた強度を示している。なお、硬化活性のあるフライアッシュを締固めると式(5)の回帰係数B値は安定材添加率30～50%の範囲では添加率に関わらず、ほぼ同じ値になり、少ない安定材添加量でも高い固化効果の得られることが明らかになった。また、安定材を30～50%添加した処理灰は3日で50kgf/cm<sup>2</sup>以上の一軸圧縮強度となり、高強度材料としての利用が可能となった。

第4章3節ではコンクリート微粉末の処理について、安定材として普通ポルトランドセメントとC A S 材とを用いて、その固化特性を調べた。そして、より高度な利用方法としてセメントと混合し、それを安定材とする高度有効利用の可能性を検討した。

安定材として、セメントの5%を固化助材としたC A S 材で置き換えることにより、セメント単独の添加に比べ顕著な強度増加がみられ、特に、安定材添加率の小さい場合と、養生初期の強度発現の大きいことがわかった。

コンクリート微粉末を道路の路床や路盤に利用できる程度の低強度を改良目標とした場合、高い長期強度を得るためには6%までの低添加率ではC A S 材を添加したC B Cが、9%以上の高添加率ではセメントだけのC Cが有効である。そして、C B Cを6%程度から10数%添加することにより、下層および上層路盤としての適用が可能となった。

一方、コンクリート微粉末を高強度材料として利用する場合、安定材としてはC A S 材を10%添加し、セメントを併用したものが養生初期から長期にかけて大きな強度を示し、セメントの最適添加量は30%である。そして、3日養生で100～200kgf/cm<sup>2</sup>程度の強度が得られ、コンクリート2次製品のような高強度材料としての利用が可能である。

さらに、セメントとコンクリート微粉末を1：1の割合で混合したものを安定材としてローム土に適用し、良好な土質安定処理効果が得られ、その結果、コンクリート微粉末の安定材としての高度利用が可能となった。

コンクリート微粉末は硬化活性が低いため、その有効利用にはセメントなどの自硬性の安定材を添加する必要がある。そこで、強度増加に貢献する反応生成物は、養生初期から長期にかけて、エトリンガイトやセメントの水和によるC S H系反応生成物、および圧縮試験時に強度低下の要因となるCa(OH)<sub>2</sub>を炭酸化したCaCO<sub>3</sub>であり、特に、処理した試料の骨格構造を形成し、

剛性を高めるのはC S H系反応生成物と考えられる。

次に、処理した試料の強度発現を回帰式で表すと、コンクリート微粉末を低強度材料に使用することを目標とした添加量の少ない場合（12%以下）、セメントだけでは養生に伴う強度の発現が急激でなく、長期にわたる強度の増加がみられるため式(4)が適合している。一方、C A S材を添加したC B Cと安定材を多量添加した処理試料では養生初期の強度増加が顕著になり、長期養生に伴う強度の増加が少ないため式(5)の相関係数が高く、コンクリート微粉末が硬化活性の低い材料であることを示している。

第4章4節では製紙焼却灰を普通ポルトランドセメントと、C A S材を添加したセメントを用いて安定処理を行い、建設材料などへの有効利用を目的として固化特性を追究した。

安定材の固化特性として、セメントは水和反応、および、水和反応により生成された石灰と焼却灰との反応により長期にわたる強度の増加がみられ、大きな強度が得られる。一方、C A S材は養生初期の強度発現が顕著であり、特に添加率の小さい処理灰ではセメントに比べ、養生初期から長期に至るまで大きな強度になる。そして、いずれの安定材でも硬化反応に必要な水分が存在すれば供試体成形時含水比が少ないほど乾燥密度が増加し、処理灰は高強度が得られる。そして、耐久性の検討が必要であるが、C A S材を10%、あるいはセメントを14%程度添加することにより下層路盤としての有効利用が可能となった。

硬化反応生成物は養生初期ではC S H系反応生成物とエトリンガイトが主なものであり、長期養生ではC S H系やC A H系反応生成物、およびモノサルフェートなどがみられ、長期強度の増加に貢献していることが明らかになった。

また、処理灰の加水混合2時間後の練り返しによる影響は、処理灰中に締固めや、安定材の硬化反応に必要な水分量があれば2時間までは影響はないことがわかった。

次に、処理灰の強度発現を回帰式で表わすと、製紙焼却灰の安定処理において、安定材としてC A S材を用いた処理灰の養生に伴う強度発現は回帰式(5)の適用性がよい。一方、安定材としてセメントを用いたものでは養生初期の強度発現が小さく、長期にわたる強度の増加がみられるため供試体成形時に締固めたものは回帰式(2)が、また、締め固めないものは回帰式(4)が最もよく適合することが明らかになった。

本論文では安定処理土の養生に伴う強度発現を定式化し、その固化効果を定量的に検討した。表-5.1は種々の処理対象試料の安定処理による強度発現を定式化した結果をまとめたものである。これによると、個々の処理対象試料の物理・化学的性質、安定材の種類やその成分、その他の条件が異なっており、単純に比較することはできないが、回帰式(4)、回帰式(5)の二つの式でほとんどの場合の強度発現が定式化できることがわかった。そして、これらの結果より

回帰式(4)、(5)に適応する処理対象試料の材料特性、および固化処理条件の目安をまとめたものが表-5.2である。安定処理を行う場合、この表に示される材料特性と固化処理条件に従って、式(4)または式(5)を選択することにより、安定処理土の養生に伴う長期強度の発現傾向を推定することが可能となる。一般に、安定処理土は長期にわたる硬化反応のため過大な強度になりやすく、処理土の変形特性の特殊性や再掘削の困難性などの問題が生じる場合が少なくない。また、施工期間の短縮や塵埃防止などの施工環境からの種々の要求も存在する。一方、安定処理の配合設計には処理対象試料の硬化活性、改良目標強度や施工期間などを考慮し、処理の目的に応じた長期強度を達成せねばならない。このような設計条件と現場での要求を満足させ、合理的な最適設計を行う際には、表-5.2で示した関係が役立つものと考えられる。

以上述べてきたように、本論文では取扱いや処理・処分が困難な自然の発生試料と産業廃棄物に石灰・セメント系安定材を添加して固化し、建設材料などへの有効利用の可能性について強度、および硬化反応のメカニズムを微視的な面から明らかにしてきた。また、安定処理土の養生に伴う強度発現傾向を定式化することにより安定処理土の長期強度の推定と品質管理への適用について検討を行った。

土質安定処理は処理対象試料、安定材の種類や養生方法が決定されると、処理効果の大きな枠組みが定まり、長期にわたる養生の強度発現もほぼ推定することが可能と考えられる。しかし、強度の発現に大きく貢献する硬化反応のメカニズムについては未解明な部分がまだ多く残されており、また、経時的に安定処理対象試料が変化し、養生条件が変化するに伴い、時時刻刻と反応機構が変化するため、その強度発現を把握することが一層困難になっている。多方面の分野からのなお一層の研究の成果が期待される。

一方、今後、益々発生量が増大する不良土と産業廃棄物の有効利用は必要で不可欠な課題であり、また、緊急を要する問題でもある。これらの有効利用のシステム化は廃棄物の種類に応じて各関係機関で研究中ではあるが、廃棄物の発生量や品質の変動の程度、地域性および処理コストなど解決しなければならない問題も多く残されており、それらの解決の努力が今後とも必要と考えられる。

表-5.1 安定処理土の強度発現を定式化した結果概要

処理対象試料	処理対象試料の 硬化活性	安 定 材 の 種 類	その他の要因	適合回帰式 の番号	備 考
ま さ 土	小	消石灰 + 水砕スラグ (粒径2.5mm以下)	低含水比養生	5	石灰だけの添加がほとんど進まないため式 (5) が合う。
			高含水比養生	1、4	
		消石灰 + 水砕スラグ (粒径74μm以下)	低含水比養生	5	
へ ど ろ	小		高含水比養生	4、5	安定材中のセメントおよびCAS材の含有量が多い。 安定材の種類による回帰式の違いはみられない。
		セメント + CAS材 消石灰 + CAS材 軟弱粘性土用特殊セメント	密封養生	5	
沖 積 粘 土	中	生石灰 + 水砕スラグ	密封養生	4、2	水砕スラグの粒径による回帰式の違いはない。
火 山 灰	中	セメント + CAS材	締固め度 大	4、5	火山灰は粗粒子で均等粒径のため空隙が大まい。 安定材の種類による回帰式の違いはみられない。
		石灰 + CAS材	締固め度 小	4、2	
国 内 炭 フライアッシュ	大	安 定 材 無 添 加	締固め度 大	3	安定材を多量用いた処理土の適合回帰式は、 セメントを添加したものは 式(5)が適合する。 フライアッシュの硬化活性に関わらず締固め度 により強度が決まる。 CAS材を添加したものは 締固めた処理土は式(5) 締固めないものは式(4)、(1)が適合す る。 フライアッシュの硬化活性により強度が決まる。
		セメント + CAS材	締固め度 小	1	
			締固め度 大	5	
			締固め度 小	4、1	
		安 定 材 無 添 加	締固め度 大、小	5	
国 外 炭 フライアッシュ	中	セメント + CAS材	締固め度 大	5	安定材の最適添加量が存在する。
			締固め度 小	4、5	
		セメント + CAS材	安定材最適添加率 (30%以上)	5	
コンクリート 微粉末	小	セメント + CAS材	安定材最適添加率 (30%以上)	5	最適添加率は9%で ある。
		セメント	安定材最適添加率 (12%以下)	4	
		セメント + CAS材		5	
製 紙 焼 却 灰	大	セメント	締固め度 大	5、2	養生初期の強度の発現が比較的小さいため式(5)を 適用すると、終局強度の推定値の誤差が大きくなる。
			締固め度 小	4	
		セメント + CAS材	締固め度 大、小	5	

注1) 安定材の種類として、ここではセメント以外の石灰、硫酸アルミニウム、炭酸ナトリウムを混合したものをCAS材として示している。

注2) 硬化活性および締固め度は相対的なものであり、厳密なものではない。

注3) 適合回帰式は最も相関係数の高いものを2つ以内で示している。

表－5.2 安定処理土の材料特性および固化処理条件と適合回帰式

安定処理土の材料特性 および固化処理条件			適 合 回 帰 式		
			式（４）	式（５）	
安 定 材	処理対象試料の硬化活性		大	石 灰	セメント、CAS材
			小	セメント	石灰、CAS材
	目標強度	数100kgf/cm <sup>2</sup> の場合	CAS材	セメント	
		数kgf/cm <sup>2</sup> の場合	石 灰	セメント、CAS材	
	添 加 量		小	大	
	固 化 特 性		小	大	
処理対象試料の硬化活性			大	小	
処 理 土 の 締 固 め 度			小	大	
処 理 土 の 粒 度 分 布			良くない	良い	
養 生 方 法			湿潤、密封養生	乾 燥 養 生	

式（４）

$$Y = A X^B$$

式（５）

$$Y = \frac{X}{A + B X}$$

## 謝 辞

本研究を実施するにあたり、終始変わらぬ御指導、御教示を賜り、本論文をまとめる機会をお与えいただきました京都大学教授赤井浩一博士に衷心より厚く御礼申し上げます。同時に、終始懇切な御指導、御鞭撻を賜り、御助言をいただいた京都大学助教授嘉門雅史博士に心から感謝致します。

また、著者が明石工業高等専門学校に奉職以来、今日までの長きにわたり、御指導賜った明石工業高等専門学校教授澤孝平博士に深く感謝の意を表します。

さらに、実験に御協力を頂いた元京都大学大学院生（現、京都府）壺内賢一氏、京都大学大学院生SUPAKIJ NONTANANANDH氏に感謝いたします。

最後に、本研究を遂行するにあたり多大な御協力をいただいた京都大学工学部土木工学教室土質力学研究室に関係の各位、ならびに明石工業高等専門学校土木工学科の各位に心から感謝する次第です。